ORIGENES DE LA COMPLEJIDAD ANIMAL

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

DISONANCIA COSMICA

DESARROLLO DEL PENSAMIENTO SIMBOLICO

CUANDO EL ANEURISMA SE COMPLICA

DETECCION DE LAS ONDAS GRAVITATORIAS

GOTAS NANOSCOPICAS DE HELIO A BAJAS TEMPERATURAS





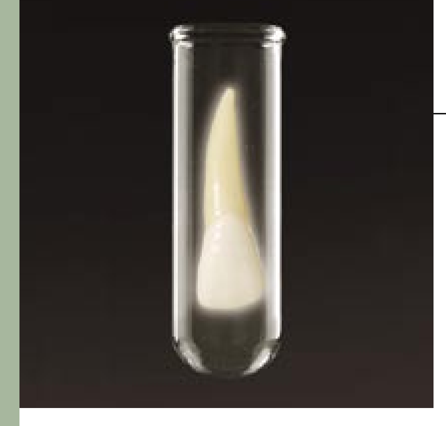
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Octubre de 2005

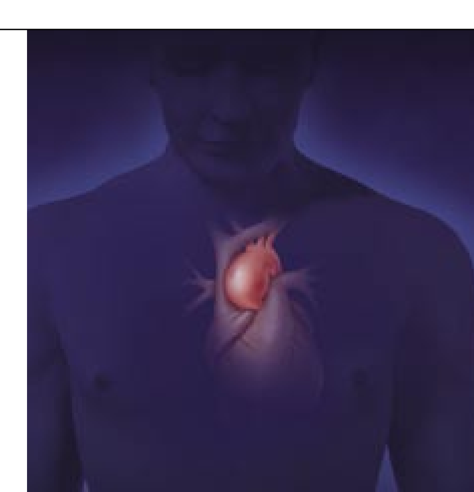
Número 349













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344   Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

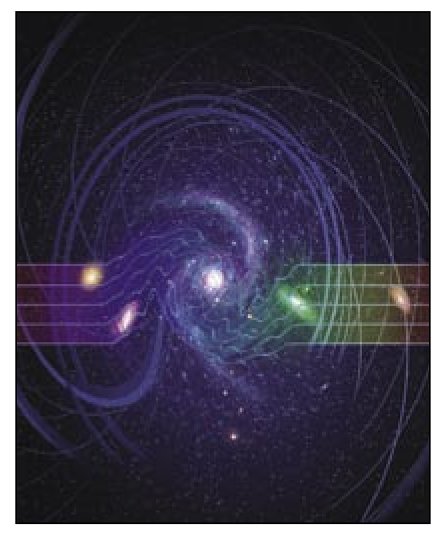
Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Dientes probeta*; Luis Bou: *Disonancia cósmica*; Joandoménec Ros: *Orígenes de la complejidad animal*; I. Nadal: *Desarrollo del pensamiento simbólico*; Cristóbal Pera: *Cuando el aneurisma se complica*; Ramón Pascual: *La detección de las ondas gravitatorias*; J. Vilardell: *Nanocuerpos*, *Hace...*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X   Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

CONFERENCIA NUCLEAR. «La Conferencia Internacional sobre los Usos Pacíficos de la Energía Atómica, en Ginebra, fue no sólo la mayor asamblea sobre energía nuclear celebrada hasta la fecha, sino probablemente la reunión internacional de científicos más fascinante jamás habida. Una de las mayores sorpresas de la conferencia la deparó el presidente doctor Homi J. Bhabha, miembro del gabinete indio, en su discurso inaugural. El doctor Bhabha predijo que antes de 20 años será posible extraer energía de la fusión controlada de los núcleos de hidrógeno pesado. Tal avance técnico garantizaría a la humanidad una fuente de energía abundante e inagotable.»

HERENCIA GENÉTICA. «¿Con qué derecho suponemos que el material hereditario, producto de un proceso de selección natural que viene operando desde hace millones de años, tiene algo de aleatorio? Al responder podemos citar el hecho de que la secuencia de dígitos del número π (3,14159265...) es también aleatoria: la serie de cifras no obedece a ningún sistema o patrón discernibles. Podríamos imaginar un matemático loco que, buscando 'números útiles', escribiese una detrás de otra secuencias aleatorias hasta que, tras rechazar por inútiles millones de números, por fin topase con el número aleatorio π y descubriese, al tantear con él, que resulta de suma utilidad. De forma análoga, en un organismo vivo en el transcurso de eones las mutaciones aleatorias podrían alguna vez, durante un dilatado intervalo de tiempo, producir una secuencia de nucleótidos que codificara una enzima nueva y útil.»

—George Gamow

...cien años

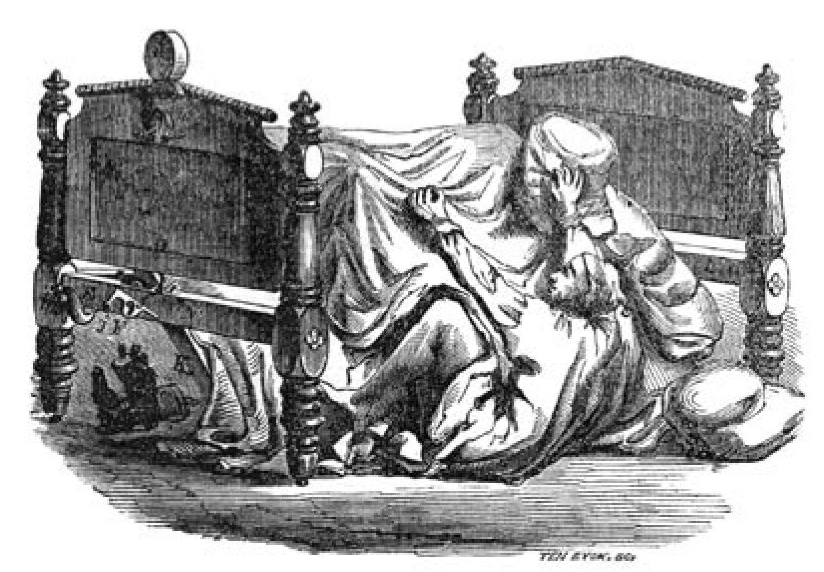
VIDA EXTRATERRESTRE. «Las recientes afirmaciones del venerable doctor A. R. Wallace, codescubridor con Darwin del origen de las especies, que sugieren que nuestra Tierra constituye el único cuerpo de la creación conocida adecuado para la vida tal como se presenta aquí sobre el globo, han despertado un gran interés entre los científicos progresistas. El doctor Wallace es ahora una persona mayor; lo mismo que Lord Kelvin, piensa que la ordenación del universo material obedece a un diseño de la Providencia. Unos afirman que no es más que un viejo senil; otros, que la vejez le ha traído sabiduría.»

...ciento cincuenta años

EL CÓLERA. «El señor don J. F. Reigert, de Lancaster (Pennsylvania), atribuye el cólera a una pequeña mosca ponzoñosa y considera que la lechada de cal constituye un antídoto definitivo. Lancaster se halla en una región caliza y nunca hasta ahora ha registrado más de diez casos de cólera, pese a mantener relaciones cotidianas con Philadelphia y Baltimore cuando en éstas se cernía la terrible enfermedad en 1832 y 1852. En su opinión, en épocas de cólera, los insectos llenan el aire en grandes enjambres, pero no se les ve con facilidad, debido a su color polvoriento; portan la enfermedad a donde lleguen, pues las personas las inhalan, de forma inadvertida, al respirar y las ingieren junto con la comida y la bebida.»

FOTOGRAFÍA MILITAR. «El Herald de Glasgow (Escocia) expone que el jefe de la milicia británica de Lanarkshire, tras haber perdido por deserción un buen número de hombres —que ya habían cobrado parte de sus primas de enganche— ha dado con un excelente medio de identificación. Cada hombre se retrata en daguerrotipo, que produce imágenes de gran fidelidad. Cuando uno desaparece de Lanark, la placa en la que está impresa su fisonomía se envía a los sargentos de reclutamiento del regimiento, que lo buscan como si se tratara de una vieja amistad.»

CAMA-DESPERTADOR. «El grabado adjunto representa, de forma contundente, la cama-despertador cuya patente ha sido concedida. Una vista en perspectiva muestra cómo el lecho opera sobre un ocupante que, temerariamente, osó dormir durante más tiempo del que tenía asignado. Cuando suena el despertador, si la persona sigue roncando, el larguero se desprende y el lecho se ladea. Todo pecador que siga durmiendo después de una cierta hora merece ser arrojado fuera de las mantas de este modo.»



Cama expulsora: un remedio para el pecado de pereza (1855).

APUNTES

CONSERVACION

Pasillos funcionales

Unos excrementos fluorescentes de pájaro podrían contribuir a iluminar unos controvertidos vaticinios ecológicos. Para que las especies no se queden aisladas en territorios fragmentados, los naturalistas suelen unir esas zonas separadas mediante franjas de hábitat, estrategia que ha sido objeto de polémica. Ornitólogos de la Universidad de Florida en Gainsville y de otras instituciones idearon un ensayo a gran escala de esos corredores, en ocho emplazamientos dentro de los pinares de Carolina del Sur. Cada uno contenía una parcela de 100 metros cuadrados de mirtos. Los frutos de estos árboles constituyen un alimento clave para el ruiseñor azul. Rodeaban a la parcela otras tres, aisladas, y la conectaba a una cuarta un corredor de 150 metros de longitud. Tras rociar con polvo fluorescente el fruto del mirto y analizar los 11.000 excrementos de ruiseñor azul resultantes, se halló que la aparición de heces era un 37 por ciento más probable en la parcela conectada que en las aisladas. Los pasillos, pues, parece que son funcionales.

—Charles Q. Choi



Corredores como éste del Parque Nacional de Banff, en Canadá, rompen el aislamiento de los hábitats.

INVESTIGACION CIENTIFICA

El conocimiento pesa

Según el economista Benjamin F. Jones, los premios Nobel y grandes inventores de finales del siglo XX realizaron su principal descubrimiento con seis años más de edad que los de principios de siglo. En general, dice, el primer logro significativo de los innovadores llega ahora ocho años más tarde. Esa menor precocidad no se compensa con un fin de su período creativo más tardío. Atribuye esta tendencia a una acumulación cada vez mayor de conocimientos en cada especialidad, que obliga a un período de formación más largo. En economía se llama productividad total de los factores a la parte del crecimiento económico que no se debe a la mera acumulación de capital y trabajo. Va ligada al desarrollo técnico, y de ella depende que la producción per cápita crezca indefinidamente. Hoy en día hay muchos más investigadores que antes. Parece que debería redundar en un desarrollo técnico mayor. Sin embargo, la productividad total de los factores no cambió gran cosa a lo largo del siglo XX. La pérdida de tiempo creativo por investigador y la necesidad de trabajar en grupos cada vez mayores explicarían esa aparente contradicción: el conocimiento acumulado no está confiriendo a los innovadores una mayor productividad creativa que compense esas circunstancias limitadoras. Si sigue sin producirse esa compensación, las perspectivas del crecimiento económico a largo plazo, concluye, no son favorables. Sólo un "cambio de paradigma", una liquidación de partes enteras del antiguo saber ante la aparición de una nueva concepción científica, tal y como la relatividad acabó con las complejas teorías decimonónicas del éter, podría aumentar, dice Jones, la productividad de los innovadores.

BIOTECNOLOGIA

Comida hinchable

Un grupo de investigación ha propuesto cultivar carne en laboratorio. Del animal deseado se extraerían unos precursores musculares llamados mioblastos y células miosatélites. Se cultivarían en biopelículas ranuradas o en gotas de colágeno que se hinchan con el calor. El estiramiento de la película o la dilatación de las gotas, sólo un diez por ciento cada vez, induciría la unión de las células y su conversión en fibras musculares. Los investigadores ya han conseguido músculo óseo para aplicaciones clínicas, y Vladimir Mironov, de la Universidad Médica de Carolina del Sur, un miembro del grupo, cultiva células de pollo en gotas. En teoría, un puñado de animales podría abastecer de carne al mundo sin que hubiese que sacrificarlo.

—J. R. Minkel



Cultivar carne en el laboratorio es posible, teóricamente al menos.

ALAN SIRULINIKOFF *Science Photo Library (arriba)*; EMILY HARRISON, CORBIS *(placa de Petri)*, ROGER CHESTER *Eye Ubiquitous/Corbis (carne) (abajo)*

EVOLUCION

Sexos realmente separados

Investigadores de Francia, Suiza, Bélgica y Japón han descubierto, al investigar colonias de la pequeña hormiga del fuego *Wasmannia auropunctata* en la Guayana Francesa y Nueva Caledonia, que, a diferencia de otras hormigas, las reinas de esa especie se clonan a sí mismas. Salen de huevos no fecundados, que reciben los genes exclusivamente de sus madres. Para no ser menos, los machos también se clonan a sí mismos, vía un genoma macho que parece capaz de eliminar toda contribución genética femenina a los huevos fecundados, con lo cual los hijos son réplicas exactas de los padres. Sólo las obreras de la especie, estériles, heredan genes de ambos progenitores, lo que significa que los acervos génicos macho y hembra son ramas independientes del árbol genealógico de esos insectos.

—Charles Q. Choi



Hembras y machos de la pequeña hormiga del fuego se clonan a sí mismos.

ASTRONOMIA

El blanco resplandor del cometa

El 4 de julio, el cohete Deep Impact de la NASA colisionaba con el cometa Tempel 1 a una velocidad de 10 kilómetros por segundo. Con ese choque previsto se buscaba poner al descubierto el interior del cometa y así estudiar la composición del sistema solar primitivo. El fulgor que se produjo reveló las características de la superficie del cometa, cráteres de impacto incluidos. Se desprendió asimismo un penacho en forma de abanico, integrado por polvo y gas que se movía a una velocidad doble que la de un avión a reacción. Los análisis iniciales sugieren que Tempel 1 posee una superficie sorprendentemente seca y porosa, a la manera de polvo de talco. El equipo a cargo de la misión había también esperado que hubiese un escape gaseoso procedente del núcleo de hielo del cometa. Desgraciadamente, el impacto no abrió un orificio de grandes dimensiones.

—J. R. Minkel



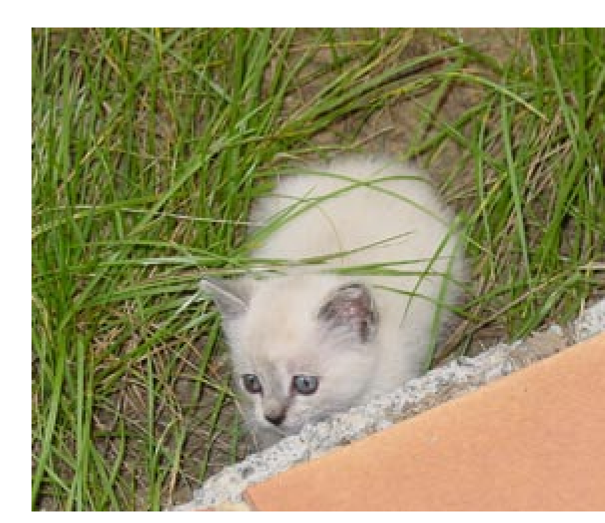
Desde el Telescopio Espacial Hubble se vio así la proyección de escombros producida por la violencia del choque.

BIOLOGIA

A los gatos no les gustan los dulces

Los receptores de azúcares de las papilas gustativas de los gatos y de otros felinos no funcionan, ha demostrado un equipo de biólogos de Filadelfia. Esos receptores están formados por dos constituyentes proteínicos, T1R2 y T1R3, codificados por los genes *Tas1r2* y *Tas1r3*. Ambos son imprescindibles para percibir el sabor dulce. Para conocer por qué a los gatos no les interesan los dulces, se han comparado los genes pertinentes de algunos felinos (el gato doméstico, el tigre y el guepardo) con los de seres humanos, perros, ratones y ratas. En las siete especies *Tas1r3* es muy similar. Sin embargo, el *Tas1r2* de los felinos se distingue notablemente del gen correspondiente en los otros animales. Le faltan numerosos nucleótidos: es un pseudogen, un gen que a lo largo de las generaciones se ha degradado hasta ser inútil. La proteína T1R2 no puede así participar en el receptor de los glúcidos y el cerebro no recibe la señal del dulzor. No quiere decir que el metabolismo de los felinos difiera del metabolismo de los otros mamíferos, que se basa en la glucosa. La carne contiene mucha glucosa, en la forma de glicógeno; estas reservas glucídicas de los músculos son del mismo tipo que el almidón y carecen, pues, de capacidad edulcorante. Las células, además, transforman los lípidos y las proteínas en glúcidos. Se ignora si el régimen estrictamente carnívoro de los félidos siguió o precedió a la pérdida de la sensibilidad al dulzor; tuvo que ser posterior a la separación entre los félidos y el otro grupo de carnívoros, los cánidos, que sucedió hará unos 30 millones de años.

—Loïc Mangin



Los gatos no perciben el dulzor.

CHRISTIAN KÖNIG *(arriba)*; NASA, ESA, P. FELDMAN *Johns Hopkins University* Y H. WEAVER *Johns Hopkins Applied Physics Lab (centro)*

Dientes probeta

El cultivo de tejido dentario abriría nuevas vías para la obtención de órganos importantes, a la vez que daría paso a la odontología regenerativa

Paul T. Sharpe y Conan S. Young








CARY WOLINSKY (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*composición fotográfica*)

De los dientes sólo nos acordamos cuando se nos caen o necesitan alguna reparación. Llegado ese momento, las opciones resultan decepcionantes: vivir sin ellos o sustituirlos por prótesis inertes. En occidente, se estima que el 85 por ciento de los adultos se han sometido alguna vez a un tratamiento odontológico. Un siete por ciento han perdido uno o más dientes a la edad de 17 años. Después de los 50, faltan una media de 12 piezas.

El diente de repuesto ideal sería la pieza fabricada a partir de tejido del propio paciente y que creciera en su futuro emplazamiento; pero tales dientes duermen en el sueño de la bioingeniería. No obstante, merced a una triple conjunción —conocimiento de las primeras etapas del desarrollo dentario, progreso de la biología de las células madre y avance de la ingeniería tisular—, la odontología regenerativa está cada día más cerca de convertirse en realidad.

Además del beneficio que conllevaría para personas que necesitan una dentadura nueva, este dominio de investigación ofrece dos ventajas significativas para someter a contrastación la viabilidad de la medicina regenerativa: la accesibilidad de los dientes y su carácter prescindible, no obstante gozar de mejor calidad de vida cuando los tenemos. Ambas pudieran parecer declaraciones triviales, pero, por un lado los dientes, servirán de bancos de pruebas excelentes donde ensayar la viabilidad de las técnicas de ingeniería de tejidos. Por otro, al tratarse de órganos no vitales, se reduce el peligro que suele acompañar a la restitución de órganos (la vida del paciente no se pone en peligro, puesto que si se comete algún fallo, se corrige).

Eso no significa que la bioingeniería dentaria se halle exenta de dificultades. En millones de años de evolución, se ha configurado un complejo proceso de producción de órganos —incluidos los dientes— en el transcurso del desarrollo embrionario. El desafío al que se enfrenta la ingeniería tisular consiste en remedar unos procesos firmemente controlados por los genes del embrión. Una buena manera de aprender a fabricar dientes es, por tanto, observar el modo de proceder de la naturaleza.

Un diálogo delicado

A las seis semanas de la concepción, el embrión, cuya longitud no llega a los tres centímetros, apenas empieza a insinuar una forma reconocible. Sin embargo, se ha establecido ya un diálogo intercelular, que dirige la odontogénesis. A la complejidad de este intercambio de señales cabe atribuir el que no se puedan cultivar *in vitro* todavía tejido dentario y otros órganos. Más aún: tal vez no se consiga nunca reproducir en el laboratorio las condiciones necesarias. Empero, cuanto mejor se comprendan los procesos precoces del desarrollo, mayores serán las probabilidades de obtener tejido dentario equipado con las instrucciones básicas de construcción del órgano, dejando que la naturaleza haga el resto.

En su mayoría, los órganos se originan a través de interacciones entre dos tipos celulares embrionarios: epiteliales y mesenquimáticos. Los dientes no son una excepción. En el embrión, las células epiteliales bucales (que tapizan las cavidades bucales) envían los primeros estímulos a las células del mesénquima (que producirán el hueso maxilar y los tejidos blandos), dándoles la orden de comenzar la odontogénesis. Una vez que las células mesenquimáticas han recibido las instrucciones iniciales, empiezan a retrotransmitir señales a las células epiteliales. Este intercambio recíproco prosigue a lo largo del desarrollo dentario embrionario.

Al principio, el futuro diente no es más que un engrosamiento del epitelio bucal embrionario. A medida que crece, el epitelio comienza a entrar en el tejido mesenquimático subyacente, que, a su vez, se condensa alrededor de esa protuberancia epitelial y forma un botón dentario. Por entonces el embrión ha cumplido siete semanas. Conforme el epitelio sigue penetrando, forma una envoltura alrededor del mesénquima que se está condensando, dando lugar a una estructura acampanada, abierta en su parte inferior. Nos presentamos así en la decimocuarta semana. Por fin, el epitelio se transformará en el esmalte externo (visible) del diente que erupciona en la encía de un bebé de entre seis y doce meses. Las células mesenquimáticas habrán formado la dentina, la pulpa dentaria, el cemento, el ligamento periodontal que une el diente al maxilar.

La forma de un diente está predeterminada por su posición, antes incluso de que empiece a desarrollarse. Algunas de las mismas señales epiteliales que indican el comienzo de la odontogénesis regulan también una importante categoría de genes en el mesénquima de la mandíbula. Nos referimos a los genes homeobox, que participan en la determinación de la forma y ubicación de órganos y apéndices en todo el cuerpo durante el desarrollo embrionario. En una mandíbula humana en desarrollo, se activan genes homeobox en distintas áreas, que guían cada botón dentario por una ruta determinada para que se convierta en un molar, un premolar, un canino o un incisivo.

Por ejemplo, *Barx*1, un gen homeobox, se activa, o expresa, mediante la acción de células mesenquimáticas en las posiciones donde van a crecer los molares. En experimentos con animales, si se provoca que *Barx*1 se exprese, por error, en un mesénquima que en condiciones normales formaría incisivos, esos dientes se desarrollan en forma de molar. Teniendo en cuenta que la capacidad de predecir y controlar la forma de los dientes resultará esencial para el cultivo de los mismos, la actividad de genes como *Barx*1 puede utilizarse como un marcador

Resumen/Odontología de punta

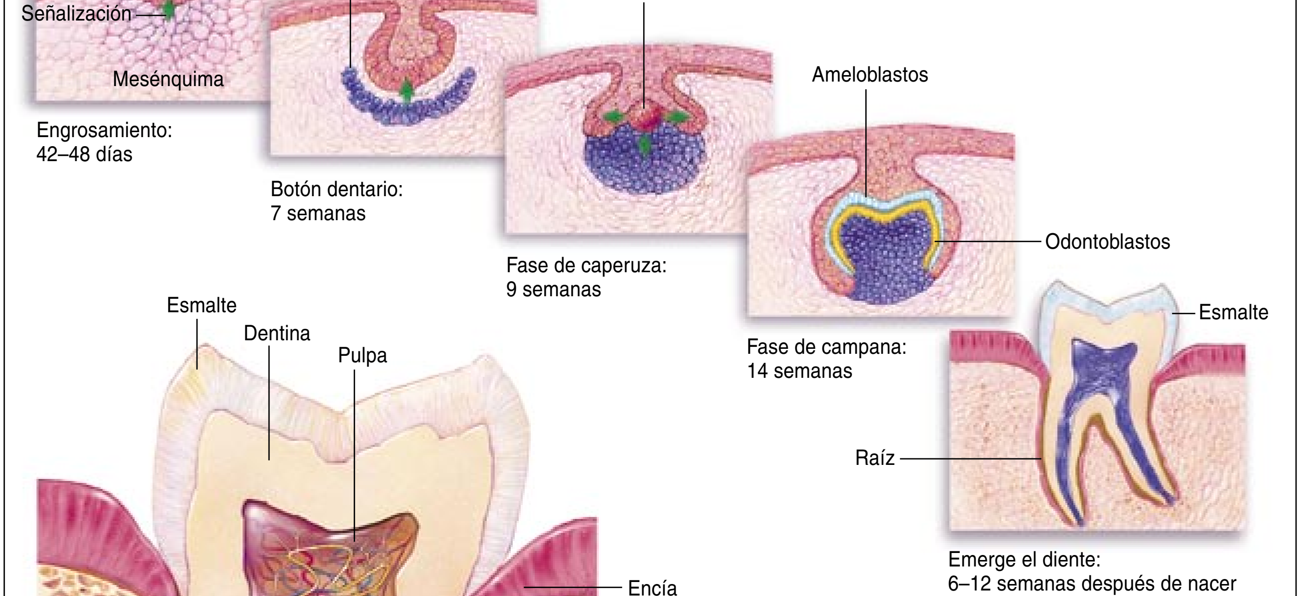
- Para la bioingeniería dentaria, los histólogos se inspiran en la odontogénesis natural: se aprestan a estimular, en tipos celulares dispares, la formación de un órgano funcional.
- Otros métodos alternativos parten de células dentarias preexistentes o bien mediante el cultivo de tejidos progenitores. Ambos planteamientos han producido ya dientes estructuralmente correctos.
- Queda aún ahondar en la formación de las raíces e identificar materias primas aptas para la bioingeniería dentaria. Con todo, la odontología regenerativa avanza a paso firme. Los dientes creados en el tubo de ensayo podrían convertirse en los primeros órganos cultivados.

ODONTOGENESIS NATURAL

Por fuera, un diente puede parecer simple. Si miramos en su interior encontraremos, en cambio, una pequeña maravilla de diseño y construcción que tarda unos 14 meses en completarse en un humano. En la odontogénesis se combinan dos tipos de tejido primordial embrionario distintos. Un diálogo molecular continuo entre ambos dirige el proceso. Los histólogos estudian estas señales y etapas para averiguar cuáles deben remedar en el cultivo de dientes en el laboratorio.

FORMACION DEL DIENTE

Ya a las seis o siete semanas del desarrollo embrionario humano, cuando la cabeza está todavía tomando forma, empieza la odontogénesis. En el lugar de un futuro diente, el tejido epitelial adquiere espesor y la expresión génica activa el envío de señales hacia el tejido mesenquimático subyacente. Al tiempo que el epitelio sigue penetrando, las células mesenquimáticas responden emitiendo sus propias señales y condensándose alrededor de la protuberancia para formar un botón dentario. A la novena semana, el epitelio se ha convertido en una caperuza que cubre el mesénquima condensado. En su centro, el primordio del esmalte dirige la actividad de las células epiteliales y de las mesenquimáticas. A las 14 semanas, el botón dentario tiene forma de campana; consta de ameloblastos, células en diferenciación que luego se convertirán en esmalte, y odontoblastos, que formarán la dentina. Las raíces constituyen las últimas estructuras en desarrollarse; completan su formación cuando emergen los dientes, entre seis y doce meses después del alumbramiento.



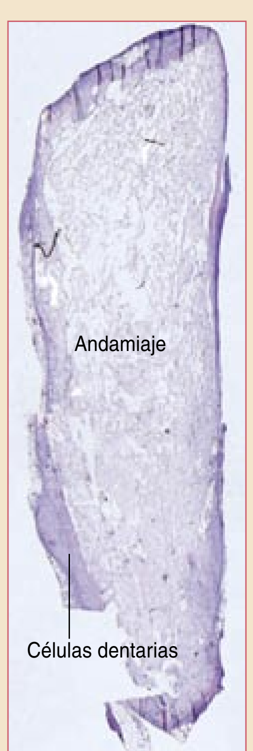
RESULTADO FINAL

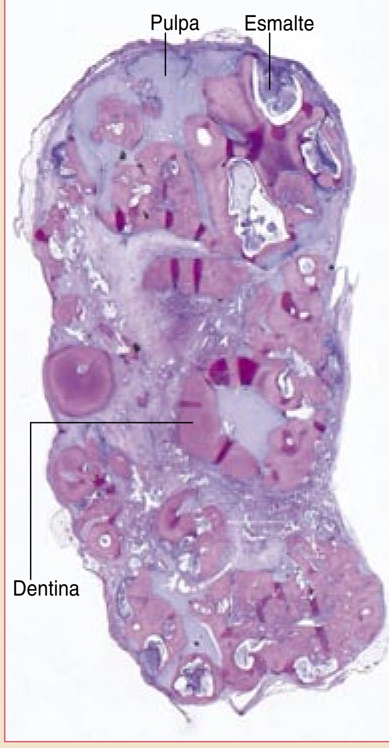
Un diente se considera un órgano porque consta de múltiples tejidos, cada uno con una función esencial. El esmalte, la superficie mineralizada más dura del cuerpo, sella y protege el interior. La dentina, una sustancia ósea, forma el grueso del diente y amortigua las fuerzas que intervienen en la masticación. La pulpa, en el centro, contiene vasos sanguíneos nutritivos y nervios que proporcionan la percepción sensorial. El cemento forma la superficie dura del diente allí donde no está cubierto por esmalte. El ligamento periodontal (tejido conjuntivo) une entre sí el cemento y el hueso de la mandíbula; ancla los dientes a la vez que les proporciona cierta flexibilidad.

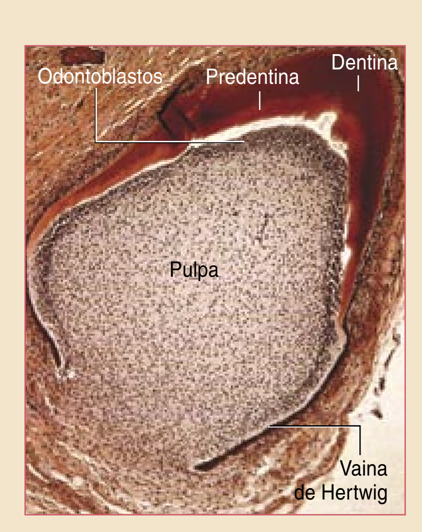
ANDREW SWIFT

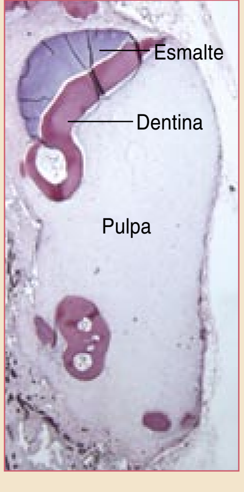
Reorganización celular

Las células dentarias obtenidas de cerdos adolescentes y sembradas en un andamiaje biodegradable aparecen en azul a lo largo de los bordes del mismo tras una semana de incubación (*arriba a la izquierda*). Tras 25 semanas de crecimiento (*arriba a la derecha*), el andamio se ha disuelto; la pulpa dental, esmalte y dentina nuevos han ocupado su lugar. En una serie de estos experimentos, se observó el desarrollo de pequeñas estructuras dentiformes en medio de los tejidos nuevos. Entre un 15 y un 20 por ciento de las mismas mostraban una correcta organización del tejido dentario (*abajo a la izquierda*), incluida la vaina de Hertwig, una estructura radicular. En otros casos, la estructura dental resultó incorrecta o incompleta (*abajo a la derecha*). De todo parece desprenderse un aval para la tesis de que las células dentarias disgregadas están capacitadas para reorganizarse y formar tejidos dentarios.









predictivo de la forma de los dientes probeta cuando éstos comiencen su desarrollo *in vitro*.

Asimismo, cada señal deberá proporcionarse en su momento justo del desarrollo. Ya en los años sesenta del siglo pasado, Shirley Glasstone, del laboratorio de investigación Strangeways en Cambridge, y otros expertos empezaron a explorar, mediante experimentos con tejidos de ratón, la posibilidad del desarrollo *in vitro* del tejido dentario. En los estudios realizados en los tres decenios subsiguientes, se combinaron muestras de dos tejidos embrionarios de ratón: epitelio y mesénquima dentarios. La mezcla resultante o bien se dejaba crecer en una placa de cultivo o se implantaba quirúrgicamente en el cuerpo de un receptor, donde recibiría aporte sanguíneo. Estos experimentos demostraron que tales primordios dentarios embrionarios seguían su desarrollo como si se encontraran aún en el embrión: producían dentina y esmalte. No obstante, su desarrollo se detenía antes de tiempo; no se llegaba a obtener dientes completamente formados. Algo faltaba en su entorno.

Con toda probabilidad, los factores de crecimiento y otras señales que se requieren para completar la odontogénesis en un embrión proceden del tejido que circunda la mandíbula. Por tanto, una solución simple consistiría en trasplantar primordios dentarios en la mandíbula para que terminaran allí su desarrollo. Así, la sustitución dentaria por bioingeniería se desarrollaría en su futuro emplazamiento para favorecer la formación de conexiones nerviosas y vasculares y su anclaje físico en el maxilar. Sin embargo, la mandíbula del adulto es muy distinta de la embrionaria; no se sabe todavía si aquélla proporcionaría el medio adecuado para la odontogénesis.

Además, para reproducir el material y la estructura naturales de las piezas dentarias, los primordios deben construirse a partir de una combinación celular justa. Sería preferible utilizar células del propio paciente, y no embrionarias, para evitar el rechazo inmunitario.

Por todo ello, tres son los retos que deben superarse para determinar la viabilidad de la odontología regenerativa. Por un lado, deben identificarse fuentes de células que formen dientes y fáciles de obtener de los propios pacientes. Por otro, los dientes producidos a partir de dichas células deben estar capacitados para desarrollarse en la mandíbula adulta, formando raíces hincadas en el hueso y adheridas mediante un ligamento periodontal. Por último, la forma y el tamaño de estos dientes deben ser predecibles y controlables de manera que puedan fabricarse a la medida de cada paciente. Pese a tratarse de tres objetivos ciertamente ambiciosos, la investigación de distintos grupos de expertos está arrojando luz sobre cada uno de ellos.

Bioingeniería dentaria

A finales de los años ochenta del siglo pasado, el cirujano Joseph P. Vacanti, de la facultad de medicina de Harvard, y el químico de polímeros Robert S. Langer, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, tuvieron una idea revolucionaria: instalar células de un órgano o tejido en un andamiaje biodegradable y prefabricado con el propósito de generar tejidos y órganos para trasplante [*véase* "Organos artificiales", por Robert S. Langer y Joseph P. Vacanti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre

de 1995]. Explicado con llaneza, aprovechaban, por un lado, que los tejidos vivos están constituidos por células en constante comunicación mutua y, por otro, que las células se mueven de un lado a otro dentro de una comunidad tridimensional de células de su mismo tipo. Cada célula parece conocer su lugar y su función dentro del colectivo que forma el tejido y lo mantiene operativo. Por tanto, si la mezcla correcta de células disociadas se reagrupa en el interior de un andamio que remede su ambiente tridimensional natural, las células deberían, de forma "instintiva", volver a formar el tejido u órgano del cual proceden.

Los éxitos iniciales de Vacanti y Langer en la regeneración de tejido hepático a partir de hepatocitos han promovido la generalización de la técnica del andamiaje, que se ha aplicado en la obtención de otros tejidos complejos: músculo cardíaco, intestino, hueso compacto y, ahora, dientes. Pamela C. Yelick y John D. Bartlett, del Instituto Forsyth en Boston, empezaron a trabajar con Vacanti hace unos años para determinar la viabilidad de esa clase de bioingeniería dentaria. Eligieron los cerdos, pues, lo mismo que los humanos, echan dos juegos de dientes en el transcurso de su vida.

Uno de los autores (Young) participó también en estos experimentos. La materia prima se obtuvo de terceros molares (muelas del juicio) aún no erupcionados de cerdos de seis meses. Para obtener una mezcla heterogénea y aleatoria de células epiteliales del esmalte y células mesenquimáticas de la pulpa, los dientes de cerdo se fragmentaron y luego se disolvieron con enzimas. De poliéster biodegradable se construyeron andamiajes con forma de diente; se recubrieron con una sustancia que torna pegajoso al plástico y, por tanto, pudieran adherirse las células. La mezcla de células se sembró entonces en los armazones. Dado que los tejidos dentarios en desarrollo requieren una amplia vascularización que les suministre nutrientes y oxígeno, los andamios sembrados se envolvieron en epiplón, un tejido blanco grasiento, rico en vasos sanguíneos, que rodea los intestinos. Por fin, se implantaron quirúrgicamente en ratas.

Al principio, los andamiajes proporcionaron soporte a las células; luego se disolvieron —como estaba previsto— y se reemplazaron por tejido nuevo. Transcurridas entre 20 y 30 semanas, se examinaron los implantes. Dentro de los límites del entramado original aparecieron pequeñas estructuras dentiformes. La forma y la organización de sus tejidos guardaban semejanza con la corona de dientes naturales. Incluían también la mayoría de los tejidos que intervienen en la odontogénesis. Quedaba demostrado que el esmalte, la dentina, la pulpa y unas formaciones que parecían raíces dentales en desarrollo podían regenerarse sobre andamiajes.

Parecía que las células dentarias se habían reorganizado en los armazones ellas mismas, adoptando configuraciones que favorecían la formación de esmalte mineralizado, dentina y tejido dentario blando. Pero, ¿y si la disposición aleatoria original hubiera favorecido el desarrollo de tejido dentario sólo por casualidad? Para salir de dudas realizaron un nuevo experimento. Usaron células dentarias epiteliales y mesenquimáticas, aisladas de los primeros, segundos y terceros molares de ratas. Esta vez, no obstante, las células se prepararon en medio de cultivo y se expandieron en tejido durante seis días antes de sembrarlas en los andamiajes e implantarlas en ratas. Tras 12 semanas de crecimiento, los tejidos resultantes se extrajeron para su examen. Una vez más, aparecieron en el interior del armazón original pequeñas estructuras dentales con esmalte, dentina y pulpa.

Los nuevos resultados, sin duda alentadores, reforzaban la hipótesis previa de que las células se reorganizaban por sí mismas en configuraciones odontogénicas. Además, las células no parecían afectadas por la etapa de cultivo: proceso esencial para la obtención de dientes mediante ingeniería tisular, dado que deberán fabricarse a partir de pequeñas muestras de tejido del propio paciente. Asimismo, el experimento demostraba la viabilidad de la regeneración dentaria en un segundo mamífero, haciendo más probable el éxito de una aplicación similar en humanos.

Aunque el equipo de Forsyth logró generar la mayoría de los tipos de tejidos de interés con células extraídas de un adulto, sólo entre un 15 y un 20 por ciento de las veces esos tejidos se autoorganizaban en la disposición adecuada para formar un diente. Así pues, el grupo prosigue la búsqueda de métodos para colocar con mayor precisión los diferentes tipos de células dentarias en el interior de los andamiajes; ello mejorará la calidad de la estructura dentaria.

Al propio tiempo, exploran la posibilidad de que tras la formación (sobre andamiaje) de tejidos dentarios se esconda algo más que la reorganización de células dentarias disociadas. ¿Y si los primordios de tercer molar suministrados por las células que se sembraron en los andamios contenían células madre —potentes progenitoras de otros tipos celulares—, que habrían sido responsables de la formación del tejido nuevo? De ser ello cierto, significaría que nuevas células madre dentarias, capaces de producir casi todos los tipos de tejidos dentarios necesarios para la obtención de dientes mediante bioingeniería, podrían hallarse en el interior de los propios dientes, al menos hasta el comienzo de la etapa adulta, cuando salen las muelas del juicio. Tales células madre dentarias, versátiles, facilitarían la generación de dientes sobre andamios; también la técnica de ingeniería dentaria ideada por el grupo de Sharpe, del King's College de Londres, podría sacarles partido.

Dientes a partir de la nada

En lugar de acometer la construcción de dientes a partir de sus células constituyentes, uno los autores (Sharpe) ha adoptado una estrategia distinta: se basa en remedar los procesos naturales del desarrollo dentario embrionario antes descritos. Para ello hay que ahondar en los principios básicos que controlan la formación precoz del diente, así como disponer de células que desarrollen las funciones del epitelio bucal embrionario y el mesénquima.

Hasta la fecha, el grupo de Sharpe ha experimentado sobre todo con células de ratón. Han utilizado células madre así como células ordinarias, procedentes de em-

briones y de adultos, para determinar el potencial odontogénico de diversos tipos celulares. En la mayoría de los casos, comenzaron por añadir células mesenquimáticas en un tubo de centrífuga hasta que formaran cierta masa sólida. Este precipitado se cubría entonces con epitelio y se cultivaba durante varios días. Al propio tiempo, se monitorizaba la actividad génica en sus tejidos para detectar posibles señales de comienzo de desarrollo dentario. A continuación, estos primordios dentarios se implantaban en animales receptores, allí donde recibieran un aporte sanguíneo nutritivo (en el riñón del ratón, por ejemplo), y se dejaban crecer durante unos 26 días.

En el curso de estos experimentos, se observó la génesis dentaria, aunque sólo cuando el origen del epitelio era embrionario y las poblaciones de células mesenquimáticas contenían al menos algunas células troncales. Cuando células madre de médula ósea adulta sustituían al mesénquima oral, por ejemplo, las formaciones trasplantadas producían dientes de estructura correcta. Parece, pues, que el mesénquima embrionario puede reemplazarse por células madre adultas en la odontogénesis.

Sin embargo, la singular batería de señales para la odontogénesis que contiene el epitelio embrionario desaparece de la boca después del nacimiento. El grupo de Sharpe prosigue la búsqueda de células sustitutivas que pudiesen derivarse de una fuente adulta. Hasta la fecha, los resultados logrados con primordios obtenidos de la combinación de células madre adultas y epitelio bucal embrionario han sido alentadores.

Estos dientes presentaban un tamaño normal dentro de los parámetros dentarios de múridos. Estaban rodeados por tejido óseo y tejido conjuntivo nuevos; mostraban las primeras señales de formación de raíces dentales. El siguiente paso consistió en averiguar si tales explantes formarían dientes en la boca. En la mandíbula embrionaria, los tejidos blandos, dientes y hueso se desarrollan a la vez sin presiones derivadas de la masticación, el habla u otros factores externos. La mandíbula adulta, en cambio, está siempre en plena actividad. Nadie sabía si ésta proporcionaría las señales necesarias para que los dientes se formaran y autointegraran en el medio, como lo hacen en el embrión.

Para averiguarlo, el grupo de Sharpe extrajo primordios dentarios de ratones embrionarios; luego, los trasplantaron en la boca de ratones adultos. Se practicaron pequeñas incisiones en el tejido blando de la mandíbula superior de los múridos receptores; en concreto, en el diastema, región sin dientes entre los molares y los incisivos. Se insertaron los primordios embrionarios en esas cavidades y se fijaron mediante pegamento quirúrgico. Entonces, se alimentó a los ratones con una dieta blanda. La evolución de las piezas trasplantadas se monitorizó. Tres semanas después, aparecían dientes en el diastema. Formados en la orientación correcta, mostraban un tamaño apropiado para los ratones y se encontraban unidos al hueso subyacente mediante tejido conjuntivo blando.

Se demostraba así que la boca del adulto sí proporciona un ambiente apropiado para el desarrollo dentario. Con todo, éste es sólo uno de los tres retos fundamentales a los que decíamos se enfrenta la odontología regenerativa. En la senda hacia la bioingeniería dentaria nos aguardan todavía varios giros.

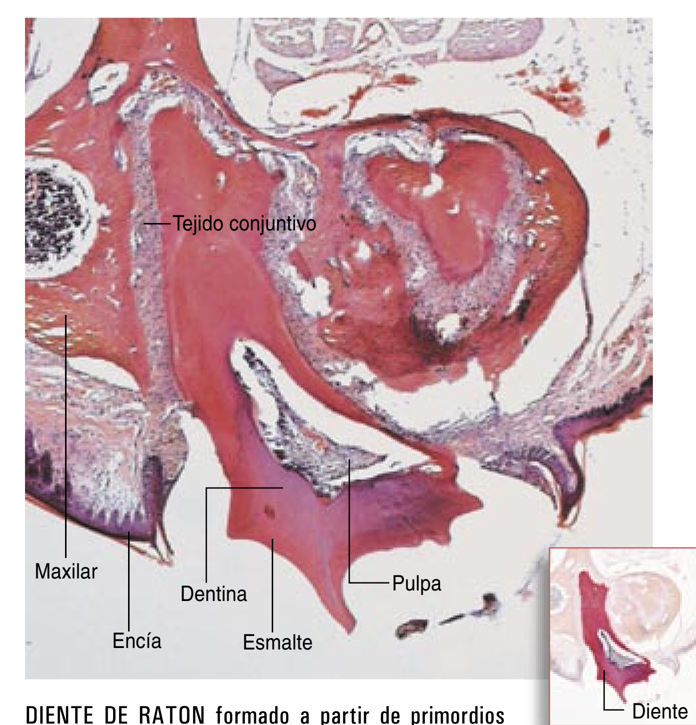
Cúspides

En comparación con otros órganos, la ingeniería del dentario ha conocido un avance notable en poco tiempo. Persiste, no obstante, la necesidad de desarrollar técnicas simples y manejables.

Nos encontramos ya muy cerca de predecir y controlar el tamaño y forma del diente, otro de los objetivos fijados. En primordios cultivados, los brotes dentarios de molares e incisivos se distinguen por su aspecto y su actividad génica; la detección es menos evidente en el caso de premolares y caninos.

Los dientes que crecían a partir de primordios embrionarios implantados en la boca de ratones adultos (experimentos del grupo de Sharpe) mostraban formas correspondientes a su localización original en el embrión: los primordios de molares se transformaron, al crecer, en dientes con forma de molar, por ejemplo. Dado que las señales relativas a la morfología se reciben al principio de la odontogénesis, los botones embrionarios del diente estaban ya programados. Debemos, pues, averiguar cómo operan estas señales iniciales para inducirlas luego en el cultivo de dientes humanos.

Hasta la fecha, los dientes obtenidos mediante cualquiera de los métodos de ingeniería tisular aquí descritos no han desarrollado raíces. En realidad, el desarrollo de las raíces así como los estímulos que inician la erupción



DIENTE DE RATON formado a partir de primordios de molar trasplantados a la mandíbula superior de un múrido. Demuestra que la odontogénesis puede producirse también en la boca adulta. En el centro de este corte del diastema de la mandíbula se observa un diente que ha atravesado la encía (un segundo diente, arriba y a la derecha de éste, se está formando todavía). En el interior del diente emergido se observa la pulpa. El color rojo tiñe los tejidos dentarios duros, resaltando el esmalte y la dentina. Aunque carece de raíces, el diente está anclado al maxilar mediante tejido conjuntivo blando.

MATT BRADMAN

dental son complejos y poco comprendidos aún. Las raíces constituyen la última parte del diente en formarse; completan su desarrollo durante la erupción. Todavía se desconoce qué condiciones serían las más favorables para la formación de estas estructuras en los dientes cultivados. Tampoco se sabe cuánto tiempo tardarían éstos en desarrollarse del todo en una boca adulta. El segundo juego de dientes "adultos" en humanos empieza su desarrollo también en el embrión; sin embargo, tardan seis o siete años en brotar, hasta 20 en el caso de las muelas del juicio. Nuestra experiencia con la obtención de dientes en animales sugiere que un diente humano obtenido mediante bioingeniería se formaría antes, aunque ignoramos si tardaría más en completar la maduración y el endurecimiento del esmalte.

También la identificación de fuentes de células odontogénicas y de fácil obtención ocupa un lugar destacado en las investigaciones sobre bioingeniería dentaria. Dichas células deberían proceder del propio paciente. Así, se evitaría el rechazo inmunitario. Además, dado que el tamaño, la forma y el color están determinados genéticamente, las piezas resultantes encajarían mucho mejor en la dentadura del paciente. El grupo de Sharpe ha descubierto que células madre mesenquimáticas adultas derivadas de la médula ósea (y probablemente disponibles también en el tejido adiposo) pueden sustituir al mesénquima embrionario en el proceso de odontogénesis. Está aún por identificar un sustituto del epitelio embrionario, aunque se habla de posibles células madre adultas en piel, pelo y otros tejidos de origen epitelial. Estos u otros tipos celulares adultos quizá podrían resultar de utilidad mediante la inducción (por manipulación genética) de las señales de odontogénesis apropiadas.

De entre las diversas fuentes celulares potenciales, los dientes pueden resultar la más conveniente. Los resultados del grupo de Forsyth sugieren que células madre capaces de formar tejidos dentarios, incluyendo el esmalte, podrían estar presentes en el interior del propio diente. Asimismo, otros han demostrado que la dentina y otros tejidos dentarios experimentan cierta regeneración natural tras sufrir una lesión, lo cual sugiere también la presencia de células progenitoras, capaces de generar tejidos dentarios. Quizás en un futuro no muy lejano, los dientes viejos se utilicen para fabricar dientes nuevos.

Los autores

Paul T. Sharpe y **Conan S. Young** se conocieron hace dos años en un congreso de odontología. Sharpe fundó y dirige el departamento de desarrollo craneofacial en el Hospital Guy's de Londres. En 2002, fundó Odontis Ltd., una compañía dedicada al cultivo de tejido dentario y tejido óseo. Young imparte clases de biología del desarrollo en la facultad de Odontología de Harvard, tarea que comparte con la investigación, en el Instituto Forsyth de Boston, sobre la obtención de dientes a partir de células sembradas en andamiajes biodegradables.

Bibliografía complementaria

INGENIERÍA DE TEJIDOS: URDIMBRE POLIMÉRICA. Robert S. Langer y Joseph P. Vacanti en *Investigación y Ciencia*, págs. 80–83; junio 1999.

TISSUE ENGINEERING OF COMPLEX TOOTH STRUCTURES ON BIODEGRADABLE POLYMER SCAFFOLDS. Conan S. Young, Shinichi Terada, Joseph P. Vacanti, Masaki Honda, John D. Bartlett y Pamela C. Yelick en *Journal of Dental Research*, vol. 81, n.º 10, págs. 695–700; octubre 2002.

BIOENGINEERED TEETH FROM CULTURED RAT TOOTH BUD CELLS. Monica T. Duailibi, Silvio E. Duailibi, Conan S. Young, John D. Bartlett, Joseph P. Vacanti y Pamela C. Yelick en *Journal of Dental Research*, vol. 83, n.º 7, págs. 523-528; julio 2004.

THE CUTTING EDGE OF MAMMALIAN DEVELOPMENT: HOW THE EMBRYO MAKES TEETH. Abigail S. Tucker y Paul T. Sharpe en *Nature Reviews Genetics*, vol. 5, n.º 7, págs. 499-508; julio 2004.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Lógica transformable

La lógica magnética quizá traiga consigo una época
en la que la configuración de los circuitos de un procesador
y la finalidad a la que sirva puedan cambiarse de modo instantáneo

Reinhold Koch

¿Flexibilidad o rapidez de cálculo? Esta dicotomía obliga a constantes compromisos cuando se diseña un microprocesador. El procesador de uso inespecífico de un ordenador personal corriente ejecuta una gama muy amplia de instrucciones, desde el manejo de gráficos hasta cálculos complejos, pero esta flexibilidad penaliza la velocidad. Por el contrario, los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), optimizados para una determinada tarea, sea el tratamiento de gráficos o una tarjeta de audio, aunque sumamente rápidos, carecen de adaptabilidad.

Ciertos procesadores ocupan un lugar intermedio entre estos dos tipos de circuitería: su lógica transformable (*morphware*) les permite reconfigurarse y optimizarse para cualquier aplicación. Valgan como ejemplo las plantillas de puertas programables por campos (FPGA por sus siglas en inglés), ya comercializadas. Se componen de grandes bloques de transistores que realizan operaciones lógicas y se "recablean" mediante instrucciones lógicas. Por estar personalizadas, las FPGA son de diez a cien veces más rápidas en el cifrado de datos, el reconocimiento automático de blancos militares o la compresión de datos; la ventaja con respecto a un procesador de uso general es notable.

Las FPGA utilizan una técnica muy conocida, CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario). No les faltan, sin embargo, limitaciones. Cambiar sobre la marcha el modo de operación —por ejemplo, pasar del cálculo de una matriz numérica a una computación de procesamiento en paralelo— requiere rehacer, con cierta lentitud, las conexiones entre grandes bloques de transistores, no entre los elementos individuales (puertas) que realizan las operaciones lógicas del procesador. Las FPGA suelen ocupar mucho espacio, lo que da lugar a una baja densidad de circuitería y limita el número y la velocidad de las operaciones de procesado.

En los últimos años, varios grupos han investigado un nuevo tipo de procesador de lógica transformable en el que se utilizan capas de materiales magnéticos para crear elementos lógicos reconfigurables. A diferencia de los sistemas basados en CMOS, su lógica no es volátil: por eso conservan la información almacenada cuando se desconecta la alimentación externa y no exigen renovación mientras el dispositivo esté funcionando. La estabilidad de los bits explica el papel esencial de los materiales magnéticos en el almacenamiento de datos, como sucede en los discos duros. Además, al no ser volátil la información, reducen el consumo de energía y realizan con un mismo elemento las diferentes funciones lógicas que normalmente requieren múltiples transistores.

Resumen/Procesador transformable

- El cerebro —la unidad central de proceso— de la mayoría de los ordenadores actuales, o está diseñado para ejecutar un amplio repertorio de instrucciones, o se optimiza para lograr la máxima rapidez en tareas concretas.
- Los procesadores caracterizados por su lógica transformable (*morphware*) ofrecen lo mejor de unos y otros diseños. Ejecutan rápidamente una aplicación y después se optimizan para otra distinta por medio de instrucciones lógicas que modifican su conexionado.
- Un nuevo tipo de procesador de lógica transformable sería el magnetológico o de lógica magnética. Se compondría de capas de materiales metálicos, cada una de ellas magnetizada para representar un bit digital. Estos procesadores "camaleónicos" variarían de función muchas veces por segundo, cambiando las puertas o el conexionado: así, por ejemplo, podrían pasar con gran rapidez de teléfono celular a reproductor musical de MP3.
- Dado que en la lógica magnética se almacenan los resultados de cada operación, el procesador podría a la vez utilizarse como unidad de memoria.

Del teléfono celular al reproductor de MP3

La lógica magnética podría situar en un nuevo nivel el procesamiento electrónico multitarea. Permitiría diseñar un teléfono celular apto para transformarse en reproductor de música, con lo que habría menos necesidad de microprocesadores separados en el equipo electrónico. Dada la gran rapidez de conmutación de estas puertas lógicas magnéticas —del orden de los gigahertz (miles de millones de ciclos por segundo)—, ese "camaleónico" procesador podría cambiar muchas veces de funcionalidad aun en el intervalo de un segundo.

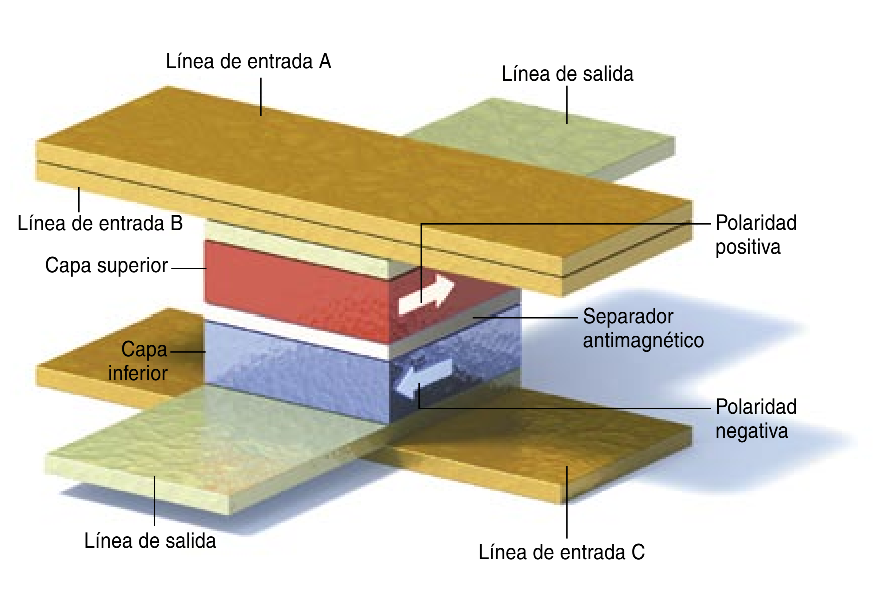
Las operaciones de la lógica magnética se apoyan en una técnica de almacenamiento de bits digitales, la memoria de acceso aleatorio magnética (MRAM), próxima a comercializarse. Cada unidad MRAM se compone de dos aleaciones metálicas ferromagnéticas: entre ellas se interpone un separador antimagnético para asegurar que la magnetización de una capa no afecte a la otra y que las polaridades del campo magnético puedan cambiarse con entera independencia (*véase el recuadro* "Funcionamiento de una puerta lógica magnética"). El elemento de memoria representa el valor de un bit digital, el cual dependerá de que las capas superior e inferior estén magnetizadas en sentidos paralelos o en sentidos opuestos. Cuando ambas capas tengan polaridades magnéticas paralelas, la resistencia al paso de la corriente eléctrica (magnetorresistencia) será menor, estado que representará, por ejemplo, el "1" digital. Y cuando las polaridades sean opuestas (antiparalelas), la magnetorresistencia aumentará, indicando un estado "0".

Para conmutar el elemento MRAM del estado de baja resistencia (1) al de alta resistencia (0), habrá de circular una corriente eléctrica por líneas de entrada conectadas al elemento. Además del simple almacenamiento en memoria de un 0 o un 1, el elemento MRAM individual sirve para representar funciones lógicas básicas, como la conjunción AND y la disyunción OR.

Las puertas de lógica magnética elementales se remontan a los primeros años sesenta, pero pronto cedieron el paso a los microchips de silicio. En 2000, William C. Black y Bodhisattva Das, de la Universidad estatal de Iowa, publicaron un informe fecundo sobre la lógica magnética basada en la magnetorresistencia. Dos años más tarde, Siemens Research, en Erlangen, Alemania,

FUNCIONAMIENTO DE UNA PUERTA LOGICA MAGNETICA

La inversión de la polaridad (*señalada por flechas*) de dos capas ferromagnéticas separadas por un material antimagnético causará la salida de un "1" o un "0" digital. Las corrientes eléctricas aplicadas a unas líneas de entrada laminares crean el campo magnético necesario para realizar tal inversión. El paso de corriente por las dos líneas superiores (A y B) cambia la polaridad magnética de la capa superior, y su paso por las tres líneas de entrada(A, B y C), la polaridad de ambas capas. La magnetización positiva (*flecha hacia la derecha*) representa un "1" digital; la negativa (*flecha hacia la izquierda*), un "0" digital. Una vez que las corrientes de entrada hayan conmutado los estados paralelo o antiparalelo de ambas capas, se leerá el resultado en forma de un bit en la línea de salida.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

exhibió experimentalmente un elemento reconfigurable magnetológico. Después, en 2003, nuestro grupo del Instituto Paul Drude, en Berlín, publicó un procedimiento que cambiaba con mayor sencillez el estado lógico de los diversos elementos de la computación.

Construcción de una puerta lógica

Una puerta lógica magnética se asemeja mucho a una célula MRAM. Consta asimismo de dos capas magnéticas separadas por un material antimagnético en las que las magnetizaciones paralelas y antiparalelas ofrecen, respectivamente, resistencias de valor bajo y alto y proporcionan las salidas lógicas "1" y "0". En general, la magnetorresistencia de los sistemas estratificados es notablemente mayor que la de los sistemas no dispuestos en capas, lo que facilita la lectura y la escritura de bits. Según el tipo de material separador utilizado, a esa forma de magnetorresistencia se la denomina o gigante o de efecto túnel. Ambas variantes dependen de los momentos angulares (espines) de los electrones, alineados todos ellos en la misma dirección, casi como si fuesen diminutas bolas que rotasen alrededor de su eje. Se utilizan la una y la otra para "leer" el valor de un bit.

El cambio de orientación del espín sirve para "escribir" un bit, es decir, para cambiar de un sentido de magnetización al opuesto. Esta inversión de polaridad en una u otra capa puede lograrse mediante el campo magnético creado por la corriente que circula por las líneas de entrada. Pero también se está examinando otro método, en el que el espín ejerce de un par capaz de conmutar de un sentido a otro la polaridad magnética de una capa [*véase* "Espintrónica", por David D. Awschalom, Michael E. Flatté y Nitin Samarth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2002].

En el diseño que hemos concebido en el Instituto Paul Drude, la puerta lógica magnética contiene tres líneas de entrada —A, B y C—, por las que circulan corrientes de igual intensidad. Nuestra idea se basa en que un solo elemento magnetorresistivo, aunque proporcione dos valores de salida (0 y 1), puede encontrarse en cuatro estados iniciales diferentes —dos paralelos, dos antiparalelos—, que permiten configurar distintos estados lógicos. Los anteriores diseños de lógica magnética exigían circuitos más complejos, que se valían, por ejemplo, de corrientes de entrada de diferente intensidad.

En nuestro diseño, la operación lógica comienza fijando la polaridad de la puerta en uno de esos cuatro estados mediante el uso de dos o tres de las líneas de entrada. Después, en una segunda etapa, se realiza la operación lógica por activación de las dos entradas superiores solamente, la A y la B. El estado que se haya elegido como inicial sólo puede invertirse cuando dos o tres de las entradas generan campos magnéticos de la misma polaridad, cambiando el valor del bit de salida de 1 a 0, o al revés (*véase el recuadro* "Cambio de bits"). La ventaja de este proceso es que puede reprogramarse el estado lógico en cada nueva operación. Dado que la puerta lógica magnética mantiene la polaridad asignada en ausencia de corriente externa, el bit queda almacenado sin precisar renovación continua y puede ser leído sin destruir la información. De este modo, la combinación de lógica y capacidad de almacenamiento ahorrará no sólo energía, sino también tiempo, en comparación con el procesamiento realizado por los circuitos CMOS ordinarios.

Para conseguir la función AND, por ejemplo, partimos de un estado antiparalelo cuya salida es 0. Visto en sección transversal, la polaridad de la capa superior apunta a la izquierda, y la de la capa inferior a la derecha. El sentido de la polaridad magnética de la capa superior sólo podrá cambiarse de izquierda a derecha aplicando corrientes positivas —que generan un campo magnético positivo— a las dos entradas A y B. La puerta OR funciona siguiendo un método análogo, pero al inicio



del procedimiento las polaridades de ambas capas han de apuntar a la derecha (estado paralelo). Las otras dos funciones básicas esenciales se obtienen por conmutación de la capa inferior. Para conmutar esta capa se han de excitar las tres entradas, A, B y C. Como la inversión de polaridad en la capa superior requiere un campo magnético menor que en la capa inferior, las dos capas pueden tratarse con entera independencia. Al conmutar la capa inferior las salidas de la función AND y OR se transforman en sus opuestas: NOT AND (NAND) y NOT OR (NOR) (*véase el recuadro* "Cambio de puertas").

Las funciones OR y AND corresponden a la suma y multiplicación booleanas, respectivamente. Unidas a las NAND y NOR constituyen una poderosa base para describir hasta los más complicados circuitos. Variando el procedimiento de excitación de las entradas, las puertas lógicas magnetorresistivas producen funciones lógicas aún más avanzadas. Un ejemplo es la puerta XOR —pieza clave de una importante unidad lógica llamada sumador total (*full adder*)—, que discrimina entre entradas iguales y opuestas: dará una salida 1 para cualquier par de entradas iguales (0/0 o 1/1), y salida 0 cuando sean opuestas (0/1 o 1/0). Para crear una puerta XOR bastan dos elementos magnetorresistivos, mientras que en la técnica CMOS se necesitan de 8 a 14 transistores.

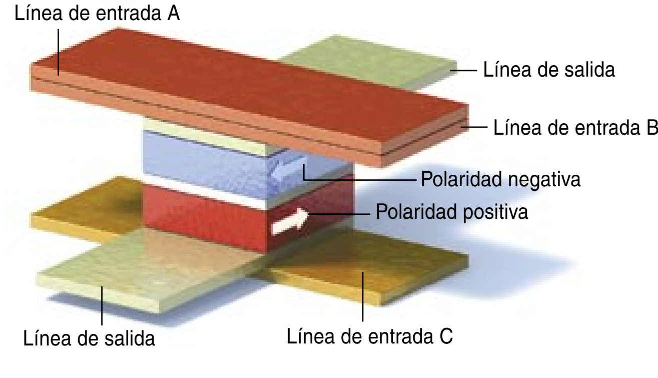
Las puertas lógicas magnéticas sirven también para construir un sumador total completo: la unidad lógica más usada en un procesador. El sumador total suma las entradas binarias A y B, más un dígito de arrastre procedente del cálculo anterior. A su vez, la suma de esos tres dígitos produce un nuevo resultado y un nuevo dígito de arrastre. La volatilidad nula y la programabilidad que ofrece la lógica magnética implican que pueda concebirse un sumador total tan sólo con tres puertas, en lugar de los 16 transistores necesarios en CMOS. El sumador total magnético podría llegar a competir en velocidad con los sumadores CMOS más rápidos y, a la vez, presentar un rendimiento energético más elevado.

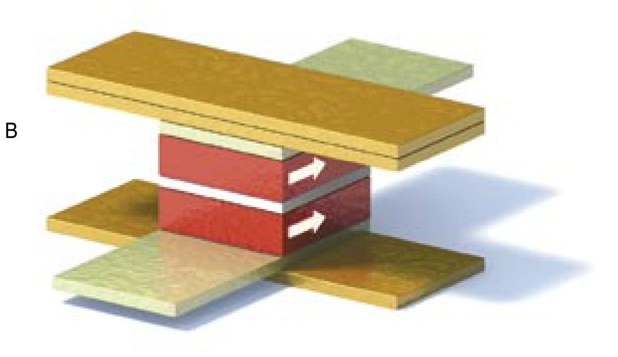
Mirar al futuro

El *morphware*, o lógica transformable, podría correr una suerte muy parecida a la que corran las células MRAM, cuya llegada al mercado está ya anunciada. Las líneas de entrada A y B se dispondrían en forma de parrilla rectangular —disposición llamada de barras cruzadas—, semejante a la de una MRAM. Los elementos de puerta magnetorresistivos se situarían en los puntos de cruce y sólo conmutarían cuando las dos líneas de entrada se activasen simultáneamente. Las puertas habrían de estar apiladas sobre una plantilla

CAMBIO DE BITS

Las operaciones de una puerta de lógica magnética se realizan en dos etapas. Por ejemplo, para crear una puerta AND se pone primero el dispositivo en estado "0" (*izquierda*): la capa superior tiene polaridad magnética negativa (*flecha hacia la izquierda*); la inferior, polaridad positiva (*flecha hacia la derecha*). Seguidamente se hace pasar por las dos líneas de entrada superiores (A y B) corrientes que crean un campo magnético positivo (*rojo*). La polaridad magnética de la capa superior se torna entonces positiva (*derecha*). En consecuencia, el bit cambia de "0" a "1" y queda almacenado en su nuevo estado. La línea de salida solamente se utiliza para leer el estado, "0" o "1", del bit.





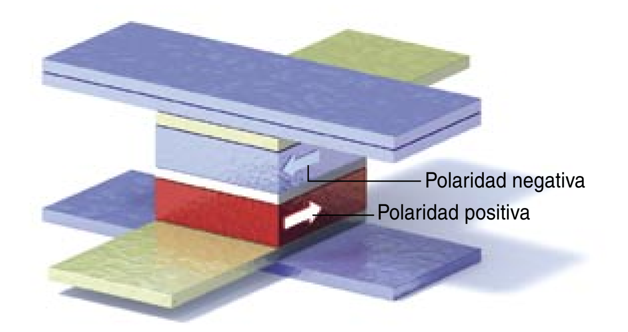
PUERTA AND

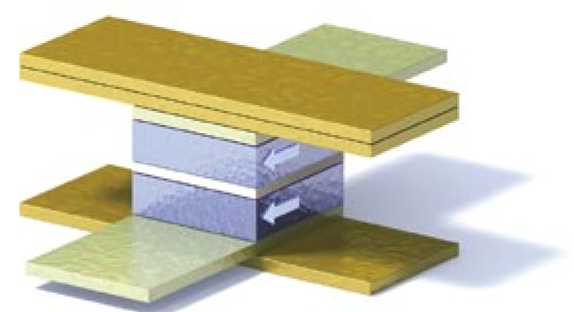
CORRIENTE	A	B	SALIDA
⇇	0	0	0
⇆	0	1	0
⇄	1	0	0
⇉	1	1	1

BRYAN CHRISTIE DESIGN

CAMBIO DE PUERTAS

La excitación simultánea de las tres líneas de entrada (A, B y C) convierte una puerta AND en su opuesta, NOT AND o NAND. A esas tres líneas (*izquierda*) se les aplican corrientes que crean un campo magnético negativo (*azul*). Entonces, la capa inferior, que presentaba una polaridad magnética positiva, conmuta a polaridad negativa. La salida de una puerta NAND (*morado en la tabla de verdad*) es opuesta a la de una puerta AND (*verde en la tabla de verdad*). La línea C no se aplica a las operaciones lógicas mostradas en las tablas de la verdad.





PUERTA AND

CORRIENTE	A	B	SALIDA
⇇	0	0	0
⇆	0	1	0
⇄	1	0	0
⇉	1	1	1

PUERTA NAND

CORRIENTE	A	B	SALIDA
⇇	0	0	1
⇆	0	1	1
⇄	1	0	1
⇉	1	1	0

BRYAN CHRISTIE DESIGN

de transistores CMOS; éstos retransmitirían las señales que indicasen el momento en que cada elemento de puerta debería iniciar y detener el procesamiento. Los transistores de esta configuración se utilizarían también para amplificar las débiles corrientes que requiere la lectura de un bit magnetorresistivo.

La mudable naturaleza de un procesador de este género ofrece muchas ventajas. Al ser programables las puertas lógicas, una circuitería inamovible ya no determina las capacidades del procesador. No así en CMOS, donde la lógica de una puerta de transistores convencional viene definida por el cableado y, por tanto, es fija. El procesador magnético está constituido por una red de puertas lógicas, cada una de ellas programable individualmente.

Un procesador magnético tan apto para transformarse necesita muchas menos puertas lógicas que uno corriente, ya que éste sólo utiliza para cualquier tarea concreta una pequeña parte de las puertas fijas. La programabilidad conlleva también la facilidad de introducir nuevos y mejores programas, incluso en procesadores magnéticos más antiguos. Dada la gran rapidez de conmutación de las puertas de lógica magnética (gigahertz), el procesador "camaleónico" puede modificar sus funciones muchas veces en el transcurso de un segundo. Además, que no sea volátil el elemento lógico —que guarde el resultado de la última operación—, favorece la rapidez. Ciertamente, los procesadores CMOS ofrecen tiempos de conmutación equiparables a los logrados por la lógica magnética, pero la ausencia de volatilidad en esta última técnica implica que no se necesite un reloj que sincronice la lectura de los bits almacenados en una memoria de ordenador; así se simplifica y acelera el procesamiento. Los propios bits quedan almacenados donde se han de procesar. A diferencia de CMOS, la lógica magnética no está obligada a reducir el tamaño de los componentes para elevar las prestaciones: en otras palabras, soslaya la miniaturización. Esta ventaja será tanto más atractiva a medida que a los fabricantes de microcircuitos les vaya costando cada vez más achicar los componentes.

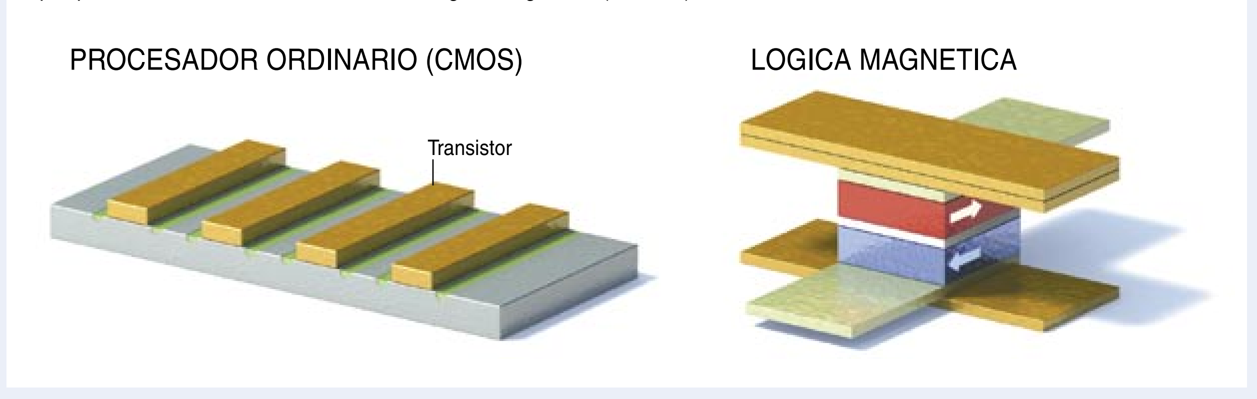
El diseño de un futuro procesador transformable todavía se considera una mera propuesta académica: nadie hasta el momento se ha planteado su desarrollo, a excepción de los pocos laboratorios que han publicado artículos al respecto. Por su gran afinidad con las MRAM, la lógica magnética puede aprovechar los trabajos de ingeniería que están abordando el acoplamiento de los campos magnéticos entre las capas de esas memorias. Pero también podría resentirse si la industria retrasara el desarrollo de las MRAM. Ciertas compañías ya han dudado en proseguir el avance en MRAM; estiman que es poco probable que una versión más de la memoria de acceso aleatorio atraiga mayores beneficios. En una primitiva versión de la lógica magnética, la propia MRAM podría funcionar como un procesador elemental, utilizable en productos de primera generación. Sin embargo, en la MRAM se conmuta una sola capa magnética y por tanto sólo podría accederse con ella a dos funciones programables, ya sean las AND/OR o las NAND/NOR.

Para obtener el máximo rendimiento de un procesador magnético transformable se han de afrontar numerosos problemas, arduos si bien superables en última instancia.

ELECCION DE PROCESADOR

	Programable	Velocidad de reprogramación	Número de componentes para la lógica básica	Temporización
Lógica magnética	Si	~0,1 nanosegundos	Una puerta de lógica magnética	Ejecuta en paralelo: no necesita reloj para sincronizar la transferencia de datos
Ordinario	No	No aplicable	Cuatro transistores	Ejecuta en serie: necesita reloj, que lo hace más lento y complejo
Plantilla de puertas programable por campos	Si	>10 nanosegundos	No modifica elementos lógicos individuales	Ejecuta en serie: necesita reloj

Se necesitan cuatro transistores (*izquierda*) para realizar las funciones de una puerta AND básica, tarea idéntica a la que puede realizar un solo elemento de lógica magnética (*derecha*).



Para empezar, ambas capas magnéticas se han de poder conmutar independientemente, lo que todavía resulta difícil en el funcionamiento real de la puerta. Además, como el procesador trabaja a plena capacidad la mayor parte del tiempo, genera localmente bolsas de calor que pueden amenazar la integridad de los datos; por ello, son mucho más estrictos los requisitos de fiabilidad en las operaciones de lectura y escritura. Es preciso demostrar que las puertas de lógica magnética pueden alcanzar una vida útil de 10^{16} a 10^{17} operaciones, lo que exige prolongar su longevidad actual en dos o tres órdenes de magnitud. Mientras eso no se consiga, cabe un remedio: detectar las puertas defectuosas y evitarlas cuando el procesador se reinicie. Para optimizar la lógica magnética, se necesitan nuevos compuestos magnéticos que sean compatibles con los semiconductores y presenten magnetorresistencia gigante [*véase* “Nanosensores de campos magnéticos”, por Stuart A. Solin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2004].

Tal vez sea uno de los obstáculos más importantes la elaboración de un lenguaje compilador y de nuevos algoritmos que aprovechen al máximo la capacidad de las puertas lógicas de reprogramarse en tiempo real. Introducir en el mercado estos procesadores magnéticos transformables exigirá un trabajo de investigación interdisciplinar en el que se conjuguen los esfuerzos de especialistas en materiales, diseño de circuitos, electrónica, computación y matemáticas.

El autor

Reinhold Koch dirige el grupo de nanoacústica en el Instituto Paul Drude para la Electrónica del Estado Sólido, en Berlín. Nacido en Austria, se doctoró en química por la Universidad de Innsbruck en 1981. Durante 1985 y 1986 disfrutó de una beca Max Kade en el Instituto conjunto de Stanford-NASA para la Investigación de Superficies y Microestructuras. De 1988 a 1998 fue profesor adjunto del departamento de física de la Universidad Libre de Berlín. En 1994 recibió el Premio Karl Scheel.

Bibliografía complementaria

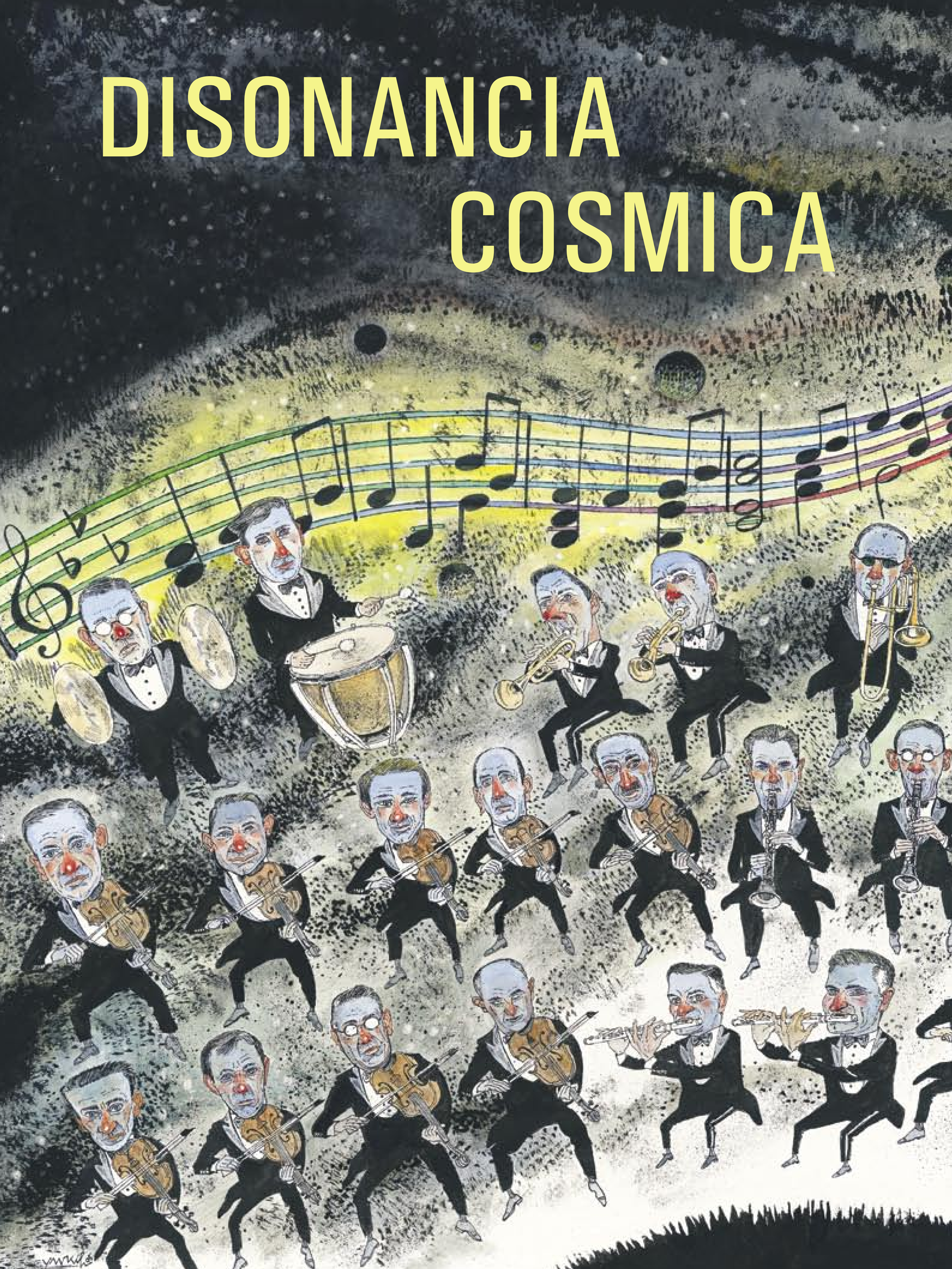
PROGRAMMABLE LOGIC USING GIANT-MAGNETORESISTANCE AND SPIN-DEPENDENT TUNNELING DEVICES. W. C. Black, Jr. y B. J. Das en *Journal of Applied Physics*, vol. 87, n.º 7; págs. 6674-6679; 1 de mayo, 2000.

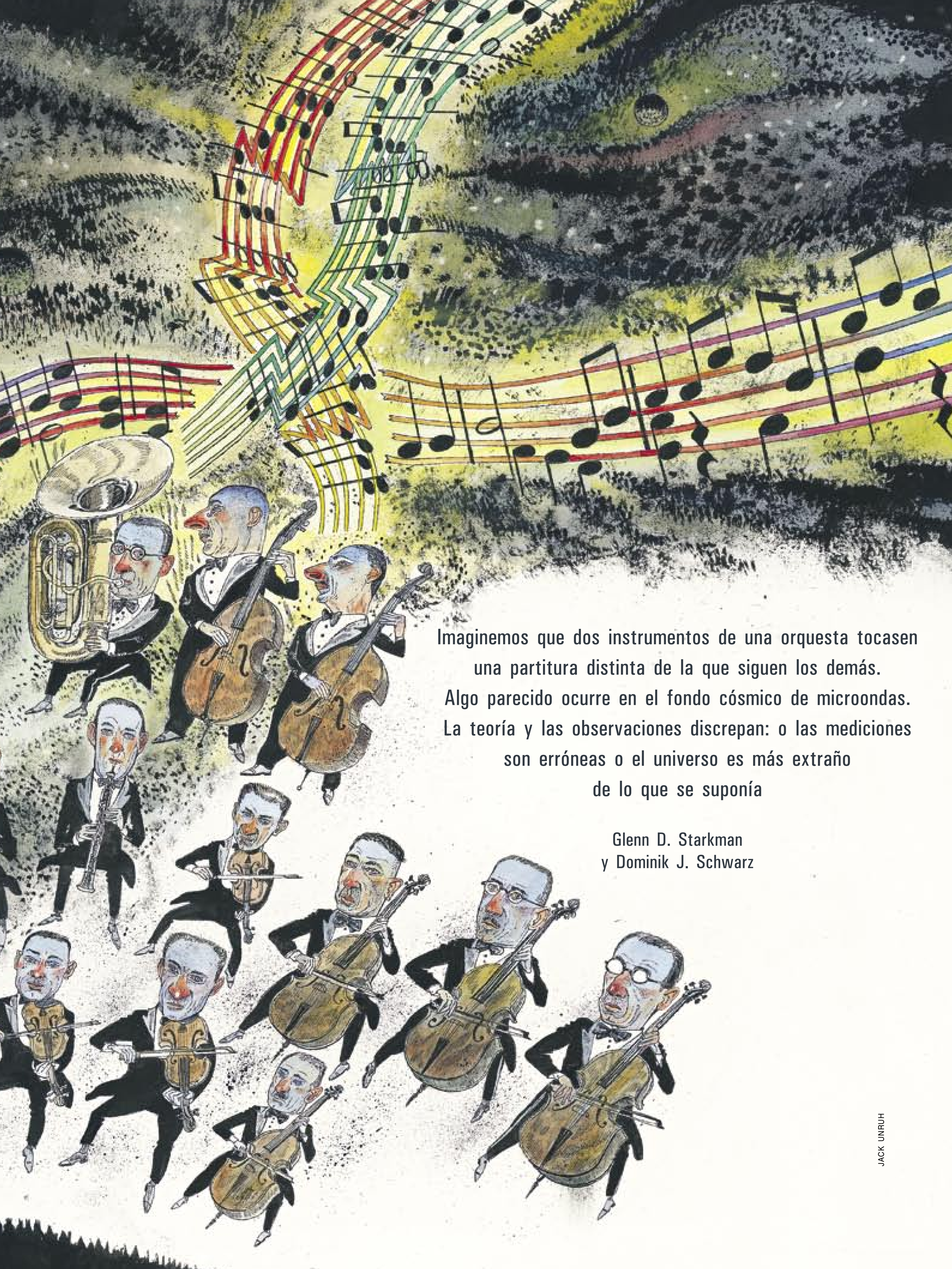
RECONFIGURABLE COMPUTING: A SURVEY OF SYSTEMS AND SOFTWARE. Katherine Compton y Scott Hauk en *ACM Computing Surveys*, vol. 34, n.º 2, págs. 171-210; 2002.

THE FUTURE OF UNIVERSAL MEMORY. Russell P. Cowburn en *Materials Today*, vol. 6, n.º 7-8, págs. 32--38; julio-agosto 2003.

PROGRAMMABLE COMPUTING WITH A SINGLE MAGNETORESISTIVE ELEMENT. A. Ney y otros en *Nature*, vol. 425, págs. 485-487; 2 de octubre, 2003.

BRYAN CHRISTIE DESIGN


DISONANCIA
COSMICA



Imaginemos que dos instrumentos de una orquesta tocasen una partitura distinta de la que siguen los demás. Algo parecido ocurre en el fondo cósmico de microondas. La teoría y las observaciones discrepan: o las mediciones son erróneas o el universo es más extraño de lo que se suponía

Glenn D. Starkman
y Dominik J. Schwarz

JACK UNRUH

Imaginemos una orquesta de tamaño prodigioso que llevara tocando sin parar 14.000 millones de años. E imaginemos que la primera impresión que nos produjese fuera de armonía, pero que, al prestar más atención, percibiésemos que la tuba y el contrabajo interpretaban una partitura diferente.

Eso mismo sucede cuando se "presta oído" a la música del universo, el fondo cósmico de microondas (FCM), nuestro privilegiado mirador a las condiciones que rigieron en el cosmos arcaico. Según parece, al poco de la gran explosión se generaron fluctuaciones aleatorias —un fenómeno cuántico— en la densidad de energía del universo. Se dilataron sobremanera hasta acabar convirtiéndose en los cúmulos de galaxias de nuestros días. Aquellas fluctuaciones se asemejaban mucho a las ondas sonoras, que son oscilaciones de la densidad del aire. Ese "sonido" que vibró por todo el cosmos hace 14.000 millones de años dejó su impronta en el FCM. Hoy observamos, impreso en el firmamento, su mapa, plasmado en las variaciones de la temperatura de la radiación cósmica de fondo.

Las fluctuaciones del FCM pueden analizarse de igual modo que las ondas sonoras: mediante su descomposición en los armónicos que las componen, es decir, en una colección de tonos puros de diferentes frecuencias. Algunos de tales armónicos están sonando con menor vigor de lo que deberían. Además, se disponen de una manera extraña: se están equivocando de partitura. Estas notas discordantes entrañan que el modelo cosmológico estándar, tan acertado en todo lo demás, se encuentra en verdaderas dificultades. O quizá sean los datos los que fallan.

El modelo cosmológico estándar se ha elaborado y corroborado a lo largo de los últimos veinte o treinta años. Ha explicado una lista impresionante de características del universo, entre ellas las proporciones relativas de los elementos más ligeros (isótopos de hidrógeno, helio y litio), y ha establecido para el universo una edad, 14.000 millones de años, acorde con las estimaciones de la edad de las estrellas más antiguas conocidas. Pronostica la existencia y cuasihomogeneidad del fondo cósmico de microondas y justifica por qué otras propiedades del universo han llegado a ser precisamente las que son.

Resumen/Discordia en los cielos

- Una teoría, el modelo lambda-inflacionario con materia oscura fría, explica muy bien muchas propiedades del universo. Sin embargo, al analizar ciertos datos, surgen discrepancias de índole fundamental.
- Los datos desconcertantes proceden del estudio de la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM). Los astrónomos descomponen las fluctuaciones del FCM en "modos", algo así como la descomposición de una orquesta en instrumentos. En este símil, la tuba y el contrabajo han perdido el ritmo, e interpretan con muy baja intensidad una partitura que no corresponde al programa.
- Es posible que los datos estén contaminados, por gas situado en los confines del sistema solar tal vez. Con todo, el modelo inflacionario, que tantos éxitos ha tenido, se encontraría en serias dificultades.

A este modelo estándar se le llama también "modelo lambda-inflacionario con materia oscura fría". Esa denominación tan enrevesada evoca a los tres componentes de mayor importancia: el proceso de inflación cósmica, una magnitud conocida por "constante cosmológica" (representada por la letra griega lambda) y las partículas de la materia oscura fría (todavía sin detectar).

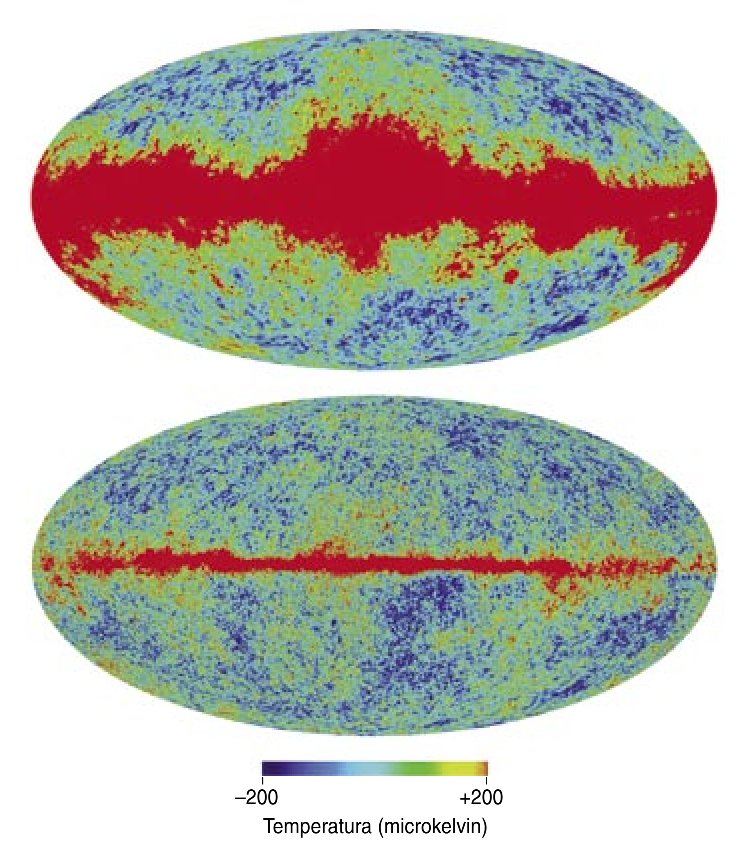
Según este modelo, la inflación fue un período de crecimiento acelerado que comenzó en la primera fracción de segundo del nacimiento del universo y concluyó con una erupción de radiación. La inflación explica por qué el universo ha adquirido semejante tamaño, contiene tanta materia y energía y dista tan poco para ser homogéneo. Explica también por qué no es cabalmente homogéneo: porque fluctuaciones cuánticas en la densidad de energía se inflaron hasta el tamaño de los cúmulos de galaxias o estructuras mayores todavía.

Terminada la inflación, la gravedad llevó a que las regiones de mayor densidad se desplomaran y aplastaran sobre sí mismas; así nacieron las galaxias y cúmulos de galaxias que vemos hoy. Favoreció todo ese proceso la materia oscura fría, compuesta por inmensas nubes de partículas que sólo cabe detectar por sus efectos gravitatorios. La constante cosmológica (lambda) viene a ser una extraña forma de antigravedad, que causa la presente aceleración de la expansión cósmica [*véase* "La constante cosmológica", por Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004].

La luz arcaica

A pesar del éxito obtenido por el modelo en la explicación de todas estas características del universo, las mediciones de las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas han abierto interrogantes de peso. La radiación de fondo es la más importante de las sondas con que cuenta la cosmología para indagar las propiedades del universo a escalas grandes. Esta radiación corresponde a la luz más primitiva de todas, pues se originó pasados sólo unos centenares de millares de años de la gran explosión, en la época en que el universo, al expandirse y enfriarse con suma celeridad, efectuó la transición de plasma denso y opaco a gas transparente. El FCM, tras 14.000 millones de años de camino, nos muestra una imagen del universo primitivo. Esta imagen, procedente de los más lejanos confines, es también una "foto" del universo visible a su máxima escala.

Los primeros en detectar la radiación cósmica de fondo y medir su temperatura fueron Arno Penzias y Robert Wilson, de los Laboratorios Bell, en 1965. Más recientemente, el frente de la investigación ha llegado a las fluctuaciones que se aprecian en dicha temperatura cuando se contemplan regiones del firmamento distintas. (Tales fluctuaciones reciben la denominación técnica de anisotropías de la temperatura.) Las diferencias de temperatura en el firmamento reflejan las primitivas fluctuaciones de la densidad del universo. El satélite COBE (Cosmic Background Explorer; "explorador del fondo cósmico") las detectó en 1992; más recientemente, el satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, "sonda Wilkinson para la anisotropía del fondo de microondas") ha levantado mapas de alta resolución de las fluctuaciones.



EL SATELITE WMAP mide las microondas que impregnan el firmamento en la banda K (23 gigahertz, *arriba*), en la banda W (94 gigahertz, *abajo*) y en otras tres bandas (*no representadas*). La esfera celeste completa se proyecta sobre el óvalo, como se hace con los mapamundi. La banda roja horizontal corresponde a radiación procedente de la Vía Láctea. Esta radiación "de primer plano" cambia con la banda de frecuencias, pero el fondo cósmico de microondas no. Ello permite identificarla y suprimirla de los datos.

NASA/WMAP SCIENCE TEAM

Un modelo cosmológico del estilo del lambda-inflacionario con materia oscura fría no calcula la distribución exacta de las fluctuaciones. Sí pronostica, en cambio, ciertas propiedades estadísticas, como su tamaño medio o el rango de tamaños que abarcan. Algunos de estos rasgos estadísticos se habían predicho ya en otros modelos inflacionarios, más sencillos y propuestos con carácter hipotético en una u otra ocasión. Dado que tales propiedades aparecen en muchos y distintos modelos inflacionarios, se las tiene por predicciones "genéricas" de la inflación: si la hubo, tales predicciones serán acertadas, con independencia de los detalles de cada modelo. La refutación de una de estas predicciones pondría la teoría de inflación en tela de juicio. Quizá pudieran hacerlo las anomalías observadas en las mediciones del fondo cósmico de microondas.

Para expresar las predicciones, conviene empezar por descomponer las fluctuaciones de temperatura en un espectro de modos, los armónicos esféricos, al igual que un sonido se puede descomponer en un espectro de notas [*véase el recuadro* "Detección de armónicos en la sinfonía cósmica"]. Según se avanzó, podemos asimilar las fluctuaciones de densidad, antes de crecer hasta llegar a galaxias, a ondas sonoras del universo. Si esta descomposición en modos parece misteriosa, recordemos el símil de la orquesta: cada modo sería un instrumento concreto, con la nota determinada que toca, y el mapa completo de temperaturas de todo el firmamento será el sonido total producido por la orquesta.

La primera de las predicciones genéricas de la teoría de la inflación acerca de las fluctuaciones es la "isotropía estadística". Es decir, las fluctuaciones del FCM no se alinean en ninguna dirección preexistente (por ejemplo, la del eje terrestre), ni tampoco determinan, tomadas en su conjunto, una dirección privilegiada.

La teoría de la inflación pronostica además que la amplitud de cada modo (la fuerza con que toca cada instrumento, si seguimos con la metáfora de la orquesta) es aleatoria, dentro de un abanico de posibilidades. En particular, la distribución de probabilidades de las amplitudes adopta una forma acampanada, o curva de Gauss. La más probable de las amplitudes, el máximo de la curva, corresponde a la amplitud nula. En general, se dan también valores no nulos de la amplitud, aunque su probabilidad disminuye tanto más cuanto más se distancien de la amplitud nula. Cada modo tiene una curva gaussiana propia, y la anchura de su distribución normal o gaussiana (la base en que se "apoya la campana") determina cuánta potencia (cuánto sonido) tiene ese modo.

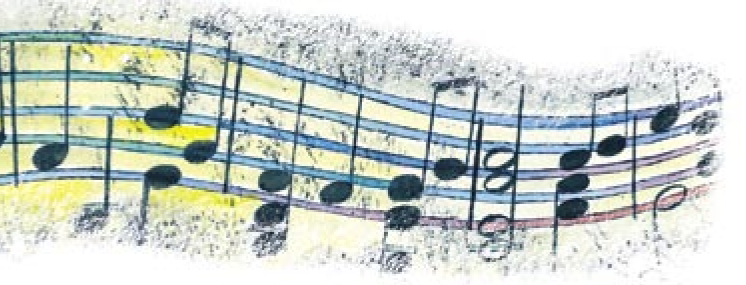
La inflación nos dice que las amplitudes de todos los modos presentan distribuciones gaussianas de anchura casi igual. Esta propiedad es la consecuencia de que la inflación, al expandirse exponencialmente el universo, borre, como una plancha que alisase hasta el último rincón, todo rastro de escalas características. Se dice que el espectro de potencias resultante es llano, por carecer de rasgos distintivos. Solamente deberían aparecer desviaciones significativas de la planitud en aquellos modos que se hubieran producido al principio o al final de la inflación.

Notas de menos

La sucesión de los armónicos esféricos representa las formas, en orden creciente de complejidad, en que puede vibrar una esfera. Al examinar más de cerca los armónicos empezamos a ver aspectos en los que las observaciones entran en discrepancia con el modelo. Resulta conveniente utilizar dichos modos, porque toda la información que podemos recibir del universo remoto se proyecta sobre una misma esfera: la esfera celeste, o firmamento. La nota más grave (denotada $l = 0$) es el monopolo: la esfera se expande o contrae como un todo. El monopolo de la radiación cósmica de fondo es su temperatura media, de sólo 2,725 grados sobre el cero absoluto (*véase el recuadro* "Detección de armónicos en la sinfonía cósmica").

La nota siguiente (denotada $l = 1$) es el dipolo, en el cual la temperatura se eleva en uno de los hemisferios al tiempo que disminuye en el otro. El dipolo está dominado por el corrimiento Doppler que el movimiento del sistema solar con respecto al FCM genera; el firmamento parece hallarse ligeramente más caliente en la dirección en que viaja el Sol.

En general, la oscilación correspondiente a cada valor de l (0, 1, 2...) recibe el nombre de multipolo. Cualquier



mapa trazado sobre una esfera, se trate de la temperatura de la radiación de fondo o de la topografía de la Tierra, puede descomponerse en multipolos. Los multipolos de orden más bajo corresponden a ondulaciones de máximo tamaño —los "océanos" o "continentes"— en el mapa de temperaturas. Los multipolos de orden superior van describiendo mesetas, cordilleras, montes (o valles y trincheras) de área cada vez menor, insertos en patrones ordenados sobre los accidentes de tamaño mayor. La compleja topografía del sistema completo es la suma de los multipolos individuales.

En el caso del fondo cósmico de microondas, cada multipolo l posee una intensidad total, C_l, que representa, hablando sin precisión, la media de las alturas de las montañas y profundidades de los valles correspondientes a ese multipolo: si se quiere, la sonoridad media de ese instrumento en la orquesta. El conjunto de las intensidades correspondiente a todos los valores de l constituye el espectro angular de potencia, que en cosmología se representa mediante una gráfica.

La gráfica comienza en C_2 porque la auténtica información relativa a las fluctuaciones cósmicas comienza con $l = 2$. En el recuadro "Problema sin resolver en los datos de WMAP" podemos ver tanto el espectro de potencias angulares medido por WMAP como el pronóstico del modelo lambda-inflacionario con materia fría oscura que mejor concuerda con todas las mediciones. Las intensidades medidas correspondientes a los multipolos de los dos valores de l más pequeños, C_2 y C_3, llamados cuadripolo y octopolo, son harto menores que las previstas. El equipo COBE había ya observado la discrepancia en las potencias correspondientes a los primeros valores de l, y WMAP ha confirmado no hace mucho dicho hallazgo. En términos topográficos: los mayores continentes y océanos son misteriosamente bajos y someros. En términos musicales: faltan el bajo y la tuba.

El efecto es más llamativo todavía si en lugar de examinar las intensidades totales (los valores C_l), se estudia la función de correlación angular, $C(\theta)$. Para comprender esta función, imaginemos que miramos a dos puntos del firmamento separados por un ángulo θ y examinamos si ambos puntos están más calientes (o ambos más fríos) que el promedio, o si uno está más caliente y el otro más frío. $C(\theta)$ mide hasta qué punto están en correlación los dos puntos en sus fluctuaciones de temperatura, promediada sobre todos los puntos del cielo. Se halla experimentalmente que la $C(\theta)$ de nuestro universo es casi nula para ángulos mayores que unos 60º, lo que significa que las fluctuaciones en direcciones separadas por más de unos 60º no guardan correlación alguna. Este resultado es otra señal de que faltan las notas graves que el modelo inflacionario prometía.

La inexistencia de correlaciones para ángulos grandes, revelada ya por COBE, ha sido ahora confirmada por WMAP. El reducido valor de $C(\theta)$ en ángulos grandes entraña que, además de ser pequeños C_2 y C_3, también es inesperada la razón de los valores de las dos o tres primeras intensidades totales: hasta C_4, por lo menos. La falta de potencia para ángulos grandes se encuentra en clamorosa discordancia con *la totalidad* de los modelos inflacionarios genéricos.

Presenta este misterio tres hipotéticas soluciones. Primera, esos resultados inesperados se deben a una mera fluctuación sin significación estadística. Es posible, en particular, que las incertidumbres de los datos sean mayores de lo estimado, lo que tornaría menos improbables los resultados observados. Segunda, pudiera ser que las correlaciones fuesen un artefacto observacional, un efecto físico inesperado que no ha sido debidamente tenido en cuenta por el equipo de WMAP al analizar sus datos. Tercera, podrían reflejar un problema más profundo en la teoría.

La primera opción ha contado con varios paladines. George Efstathiou, de la Universidad de Cambridge, en 2003, inició la crítica contra los métodos estadísticos utilizados para extraer la intensidad del cuadripolo y su incertidumbre; sostuvo que los datos implicaban una indeterminación mucho mayor. Desde entonces, otros han venido indagando en los métodos utilizados por el equipo WMAP para extraer los valores C_l correspondientes a los primeros índices l; han llegado a la conclusión de que las incertidumbres causadas por la Vía Láctea, nuestra galaxia, son mayores de lo que los investigadores en un principio habían supuesto.

Alineaciones misteriosas

Con la intención de evaluar estas dudas sobre la importancia de la discrepancia, varios equipos han indagado más allá de la información contenida en los C_l, que representan la intensidad total de un multipolo. En efecto, cada multipolo contiene, además de C_l, información direccional. El dipolo, por ejemplo, está orientado en la dirección de la mitad más caliente del cielo. Los multipolos de orden superior contienen todavía más información direccional. Si la discrepancia de intensidad sólo fuera una fluctuación aleatoria, cabría esperar que la información direccional deducida de los mismos datos presentara un comportamiento genérico correcto. Pero no ocurre eso.

El primer resultado extraño llegó en 2003, cuando Angelica de Oliveira-Costa, Max Tegmark —ambos entonces en la Universidad de Pennsylvania—, Matías Zaldarriaga, de Harvard, y Andrew Hamilton, de la Universidad de Colorado en Boulder, observaron que los ejes preferidos de los modos cuadripolares, por una parte, y de los octopolares, por otra, se hallaban casi alineados. Tales modos son los mismos que parecerían mostrar menor potencia de la esperada. El modelo inflacionario genérico pronostica que cada uno de estos modos debería ser completamente independiente: no serían de esperar alineaciones.

También en 2003, Hans Kristian Eriksen y sus colaboradores, de la Universidad de Oslo, presentaron más resultados que apuntaban a la existencia de alineaciones. Dividieron el firmamento en todos los posibles pares de hemisferios y examinaron las intensidades relativas de las fluctuaciones en las mitades opuestas del cielo. Sus hallazgos contradecían la cosmología inflacionaria estándar: los hemisferios, a menudo, tenían muy diferentes



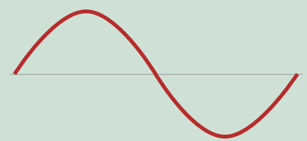
Detección de armónicos en la sinfonía cósmica

Cuando se afirma que ciertos instrumentos de la radiación cósmica de fondo están desafinando en pianísimo, ¿qué se quiere decir? Además, ¿cómo se sabe?

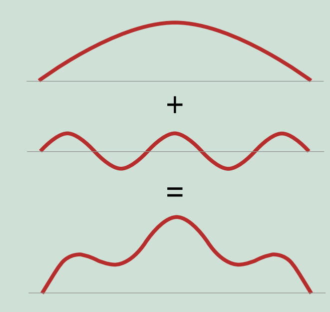
Las investigaciones sobre la radiación de fondo analizan fluctuaciones de temperatura medidas en todas las direcciones del firmamento. El análisis se realiza mediante armónicos esféricos, unas funciones matemáticas. Pensemos en una cuerda de violín. Puede emitir un número infinito de notas, aun cuando el dedo no la pise para acortarla. A cada nota puede asignársele un entero n, igual al número de nodos de la cuerda (los puntos que permanecen inmóviles, exceptuados los extremos) cuando emite esa nota musical.

La nota más grave, que carece de nodos (n = 0), se llama tono fundamental. Toda la cuerda, excepto sus extremos, se mueve simultáneamente hacia arriba o abajo.

La nota que contiene un solo nodo en su parte central (n = 1) es la primera oscilación armónica. En este caso, la mitad de la cuerda oscila en un sentido y la otra mitad, al mismo tiempo, en el contrario. Cuando se entona *do-re-mi-fa-sol-la-si-do*, el *do* final es el primer armónico del tono fundamental correspondiente al primer *do*. La nota que tiene dos nodos equidistantes es el segundo armónico, y así sucesivamente.

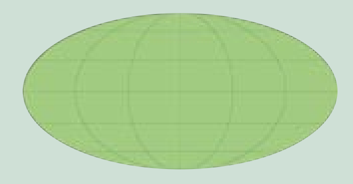


Por complicada que sea la forma en que vibre la cuerda, siempre es posible descomponerla en sus armónicos. Podemos, por ejemplo, considerar que la vibración que vemos abajo es suma del tono fundamental (n = 0) y del cuarto armónico (n = 4). Observemos que el cuarto armónico tiene en la suma menor amplitud (sus ondas son menos acusadas) que el tono fundamental. En el símil orquestal, el instrumento número cuatro está tocando con menos fuerza que el instrumento número 0. En general, cuanto más irregular es la vibración de la cuerda, mayor es el número de armónicos necesarios en la suma.

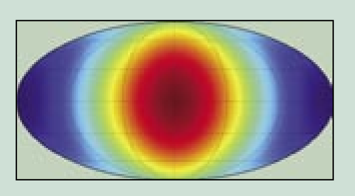


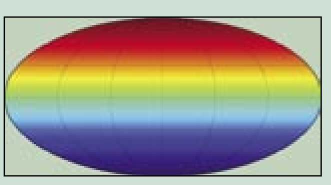
Examinemos ahora armónicos esféricos —denotados Y_{lm}—, en los cuales los modos ocurren en un "tambor" esférico. Dado que la superficie de la esfera es bidimensional, para la descripción de las modalidades se necesitan dos números, l y m. Para cada valor de l (que puede ser 0, 1, 2...), m puede ser cualquier número entero comprendido entre $-l$ y l. La combinación de todas las diferentes notas que tengan el mismo valor de l y diferentes valores de m, cada una con su amplitud respectiva (o en términos sonoros, su volumen), se denomina "multipolo".

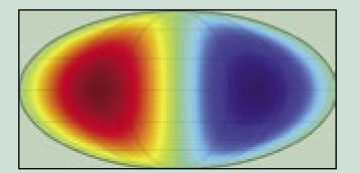
A diferencia de la cuerda de violín, no es posible dibujar fácilmente los armónicos esféricos. Lo que haremos es mostrar mapas de la esfera, sus regiones coloreadas según tengan una temperatura mayor o menor que la media (la esfera de los cielos no vibra; las temperaturas de la radiación de fondo fluctúan conforme a la proyección en la esfera inmóvil de los armónicos esféricos que tendría si vibrase; la forma oval del mapa se debe a la proyección y extensión de la esfera sobre un plano, a la manera de un mapamundi). El monopolo, donde l = 0, corresponde a la vibración pulsante de todo el tambor esférico.



En el dipolo (l = 1) la mitad del tambor pulsa hacia el exterior (*en rojo*) y la otra mitad lo hace hacia el interior (*en azul*). El dipolo tiene tres modos de oscilación (m = –1, 0, 1) en las tres direcciones perpendiculares del espacio (hacia adentro o hacia afuera de la página, hacia arriba o abajo, y hacia la izquierda o la derecha).

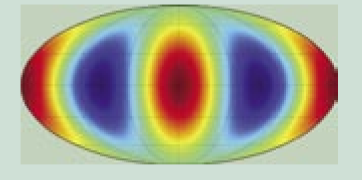


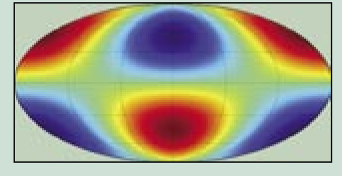


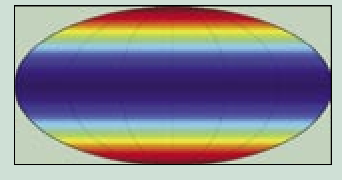


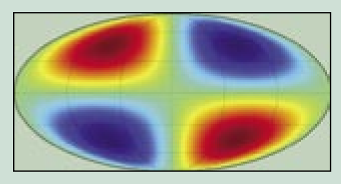
Las regiones de color verde se encuentran a temperatura media; estas líneas nodales son homólogas de los nodos de la cuerda vibrante. Al aumentar l lo hace el número de líneas nodales.

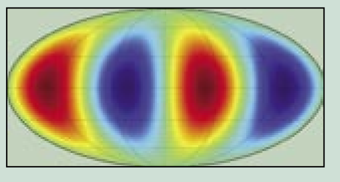
El cuadripolo (l = 2) tiene cinco modos, cada uno con una configuración más compleja de oscilaciones —variaciones de la temperatura— en la esfera (*bajo estas líneas*).











Es posible descomponer cualquier patrón de distribuciones térmicas sobre una superficie esférica en una suma de estos armónicos esféricos, al igual que cualquier vibración de la cuerda de violín es descomponible en suma de oscilaciones armónicas. Cada armónico esférico de la suma tiene una amplitud específica, que representa, en esencia, su magnitud o, si se quiere, el vigor con que está tocando ese "instrumento de la orquesta cósmica".

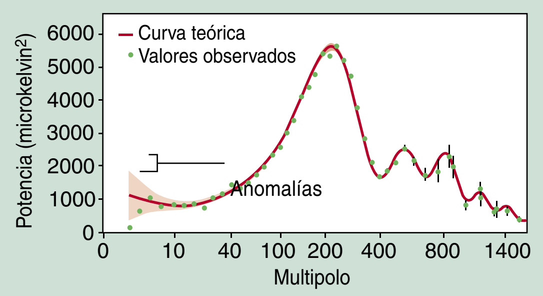
CRAIG COPI *Case Western Reserve University (armónicos esféricos)*; ALISON KENDALL *(cuerdas)*

Problemas sin resolver en los datos del WMAP

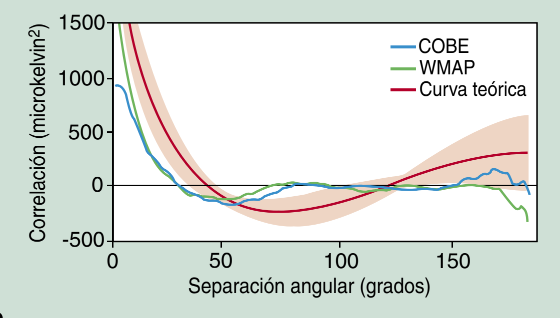
EL SATELITE WMAP produce datos desconcertantes por tres razones.



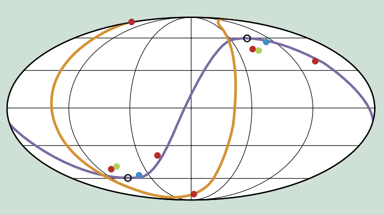
1 ESPECTRO ANGULAR DE POTENCIA
La mayoría de las mediciones efectuadas por WMAP, al igual que las de experimentos anteriores, está en excelente concordancia con los valores pronosticados a partir del modelo lambda-inflacionario con materia oscura fría. Sin embargo, los datos correspondientes a los dos primeros puntos (el cuadripolo y el octopolo) tienen una potencia anómala, demasiado pequeña.



2 FUNCION DE CORRELACION ANGULAR
Esta función pone en relación datos tomados de puntos celestes separados por un ángulo dado. Las curvas de datos de COBE y de WMAP deberían ajustarse a la curva teórica. En cambio, son prácticamente nulas cuando la distancia angular supera unos 60 grados.



3 ALINEACION DE LOS DOS PRIMEROS MULTIPOLOS
El cuadripolo (*en azul*) y el octopolo (*en rojo*) deberían hallarse dispersos al azar. En cambio, se agrupan en la proximidad de los equinoccios (*círculos en blanco*) y en la dirección de movimiento del sistema solar (dipolo, *en verde*). Además, yacen sobre todo en el plano de la eclíptica (*violeta*). Hay dos que se encuentran sobre el plano supragaláctico que contiene a la Vía Láctea y a la mayoría de sus galaxias y cúmulos vecinos (*en naranja*). La probabilidad de que estas alineaciones se deban al azar es menor de 1 en 10.000.



valores de potencia. Pero lo más sorprendente era que el par de hemisferios que mostraba mayor diferencia eran los situados por encima y por debajo de la eclíptica, que es el plano de la órbita terrestre alrededor del Sol. Este resultado fue la primera señal de que las fluctuaciones en la radiación de fondo, que se suponían de origen cosmológico, aunque un tanto contaminadas por la emisión de nuestra propia galaxia, contienen una señal del sistema solar; es decir, un cierto tipo de artefacto observacional.

Entretanto, el trío integrado por uno de los autores (Starkman), Craig Copi y Dragan Huterer había desarrollado una nueva representación, ahora vectorial, de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas. Esta metodología nos ha permitido (a Schwarz, Starkman, Copi y Huterer) poner a prueba la conjetura de la isotropía, según la cual las fluctuaciones en la radiación de fondo no singularizan ninguna dirección en el universo. Nuestro grupo, además de confirmar los resultados del grupo de Oliveira-Costa, puso de manifiesto en 2004 la existencia de correlaciones inesperadas. Varios de los vectores se encuentran sorprendentemente cercanos al plano de la eclíptica. Ya en ese plano, se sitúan cerca de los equinoccios, que son los dos puntos donde la proyección del ecuador sobre el firmamento corta a la eclíptica. Estos mismos vectores se encuentran, además, próximos a la dirección de traslación del Sol por el universo. Otro vector se encuentra muy próximo al plano supergaláctico, o plano definido por el supercúmulo de galaxias local.

La probabilidad de que cada una de estas correlaciones se dé por accidente es menor de 1 parte en 300, incluso con estimaciones estadísticas prudentes. Aunque no son independientes unas de otras, la probabilidad combinada de su ocurrencia por azar no llega a 1 en 10.000, y en este cálculo no se han incluido todas las propiedades extrañas de los multipolos de orden bajo.

Algunos investigadores han expresado sus reparos ante el hecho de que todos estos datos se hayan derivado de mapas del fondo cósmico de microondas para todo el cielo. Podría parecer ventajoso servirse del mapa completo del cielo, pero pudiera ocurrir que las temperaturas del FCM determinadas en una franja centrada en nuestra galaxia careciesen de fiabilidad. Para inferir la temperatura del fondo cósmico de microondas en esta franja galáctica, es preciso eliminar primero las contribuciones de la galaxia. A lo peor, las técnicas utilizadas por el equipo WMAP y otros no fueran lo bastante de fiar. De hecho, el equipo WMAP advierte a otros investigadores de la inconveniencia de utilizar su mapa completo del firmamento; en sus propios análisis, sólo recurre a partes del cielo situadas fuera de la galaxia.

Cuando Uros Seljak, de la Universidad de Princeton, y Anze Slosar, de la Universidad de Liubliana, excluyeron la franja galáctica, apreciaron que la significación estadística de algunas de estas alineaciones disminuía en determinadas longitudes de onda, pero observaron también que las correlaciones aumentaban en otras longitudes de onda. Nuestras propias investigaciones posteriores inducen a pensar que los efectos de la galaxia no pueden explicar las correlaciones observadas. A decir verdad, resultaría muy sorprendente que la causa de que

NASA/WMAP SCIENCE TEAM (*imagen*); ALISON KENDALL (*gráficas*)

el FCM se alinease con el sistema solar fuera un mal conocimiento de la galaxia.

La realidad de estas conexiones entre el fondo de microondas y el sistema solar cobra aún más fuerza al escrutar de cerca el espectro de potencia angular. Además de la falta de potencia para valores pequeños de l, existen otros tres puntos, a saber, $l = 22$, $l = 40$ y $l = 210$, en los cuales el espectro de potencia observado difiere significativamente del espectro previsto por el modelo lambda de materia oscura fría que logra el máximo ajuste. Si bien este conjunto de diferencias ha sido observado por muchos, lo que ha escapado a la atención de la mayoría es que tales desviaciones guardan relación con la eclíptica.

Hay dos explicaciones que destacan como las más probables para la correlación entre la escasa potencia de la señal del FCM para los primeros valores de l y las características del sistema solar. La primera es la comisión de un error en la construcción de los instrumentos de WMAP, en los principios en que se fundaron o en el análisis de sus datos (lo que se denomina "la sistemática"). Sin embargo, el equipo del WMAP, superlativamente cuidadoso, ha efectuado numerosas comprobaciones y recomprobaciones de sus instrumentos y de sus métodos de análisis. Además, hemos encontrado correlaciones similares en el mapa generado por el satélite COBE, en el que se utilizaron instrumentos y métodos de análisis distintos, por lo que habría tenido una sistemática en su mayor parte independiente de la del WMAP.

Una explicación más probable es que una fuente inesperada, o un sumidero, de fotones de microondas esté contaminando los datos. Esa nueva fuente habría de estar asociada con el sistema solar. Esta explicación no carece de dificultades. ¿Cómo se logra que una fuente del sistema solar emita a aproximadamente la misma longitud de onda que la radiación cósmica de fondo, con intensidad suficiente para ser vista por los instrumentos, o que absorba a las longitudes de onda de la radiación cósmica, y permanezca, sin embargo, invisible en todas las demás longitudes de onda, razón por la cual no habría sido descubierta todavía? Confiamos en que acabará siendo posible estudiar esta fuente de primer plano con detalle suficiente como para descontaminar los datos sobre la radiación de fondo.

¿De vuelta al tablero de diseño?

A primera vista, cabría pensar que el descubrimiento de un contaminante de los datos de radiación cósmica de fondo en el sistema solar resolvería el enigma de la debilidad de las fluctuaciones a gran escala. En realidad, agravaría el problema. Cuando se elimine la parte procedente de esa hipotética fuente cercana, es probable que la contribución cosmológica restante sea todavía menor de lo que hasta ahora se creía. (Cualquier otra conclusión exigiría que hubiese una anulación casual entre la contribución cósmica y nuestra presunta fuente.) Y entonces resultaría todavía más difícil sostener que la falta de potencia para pequeños l es pura casualidad estadística.

Si se concluye, con robustez estadística, que la energía existente a grandes escalas es menor de la esperada, quizá debamos volver al tablero de diseño del universo primitivo. Las alternativas que hoy se manejan para la teoría genérica de inflación no resultan nada atractivas: un modelo inflacionario, diseñado con finura, podría producir una anomalía en el espectro de potencias en la escala precisa para que se siga de ahí la falta de potencia observada a grandes escalas. Pero esta "inflación a la medida" a duras penas podría considerarse una teoría solvente: recordaría a los epiciclos que Ptolomeo añadió a las órbitas de los cuerpos celestes para que éstas se adaptasen a la cosmología geocéntrica.

Otra posibilidad consiste en que el universo posea una topología cósmica insospechadamente compleja [*véase* ¿Es finito el espacio?, por Jean-Pierre Luminet, Glenn D. Stark y Jeffrey R. Weeks; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1999]. Si el universo fuese finito y se contorsionara sobre sí mismo, a la manera de una rosquilla o una trenza de repostería, los posibles modos de vibración del universo se transformarían de una forma perceptible. Tal vez nos fuera posible "oír la configuración del universo", al igual que se puede apreciar la diferencia entre las campanas de una iglesia y un carillón. Las notas más graves —las fluctuaciones correspondientes a grandes escalas— serían las que más claramente transmitirían la morfología (y el tamaño) del universo. Es posible que el universo tenga una topología compleja, pero de manera tal que la inflación la haya llevado justo más allá del horizonte. En tal caso, no sólo costaría mucho verla: resultaría muy difícil establecer su naturaleza.

¿Hay esperanza de solución? Sí: vamos a contar con más datos del satélite WMAP, no sólo relativos a las fluctuaciones de temperatura del firmamento, sino también sobre la polarización de la luz captada; esta nueva información podría descubrir fuentes cercanas. La Agencia Europea del Espacio lanzará en 2007 la misión Planck, que medirá el fondo cósmico de microondas en más bandas de frecuencia y con mayor resolución angular que WMAP. No se confía en que su mayor resolución angular ayude a resolver el problema de los primeros valores de l, pero la observación del firmamento en muchos más "colores" de microondas nos permitirá controlar mucho mejor la sistemática y el fondo. La investigación cosmológica sigue y seguirá trayéndonos sorpresas.

Los autores

Glenn D. Starkman y **Dominik J. Schwarz** empezaron su colaboración en 2003, cuando se hallaban en el CERN. Starkman es profesor en la Case Western Reserve University. Schwarz, que acaba de aceptar un puesto docente en la Universidad de Bielefeld, se siente atraído por la naturaleza del universo y los momentos iniciales de éste.

Bibliografía complementaria

FIRST YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: PRELIMINARY MAPS AND BASIC RESULTS. C. L. Bennett et al. en *Astrophysical Journal Supplemental*, vol. 148, pág. 1; 2003.

LA SINFONÍA CÓSMICA. Wayne Hu y Martin White en *Investigación y Ciencia*, págs. 42-51, abril de 2004.

La página de WMAP en la Red se encuentra en http://wmap.gsfc.nasa.gov/

Tarraco

Basílica jurídica y capitolio

A lo largo de los dos últimos años hemos venido investigando un sector de la actual ciudad de Tarragona correspondiente al área del foro de la antigua colonia romana de *Tarraco*, la capital de la provincia Hispania citerior.

Este sector había sido ya excavado en los años veinte del siglo pasado. Se puso entonces de manifiesto la presencia de un gran ámbito porticado, con locales anexos e importantes hallazgos de esculturas y epígrafes que permitieron entonces identificarlo como la propia plaza forense.

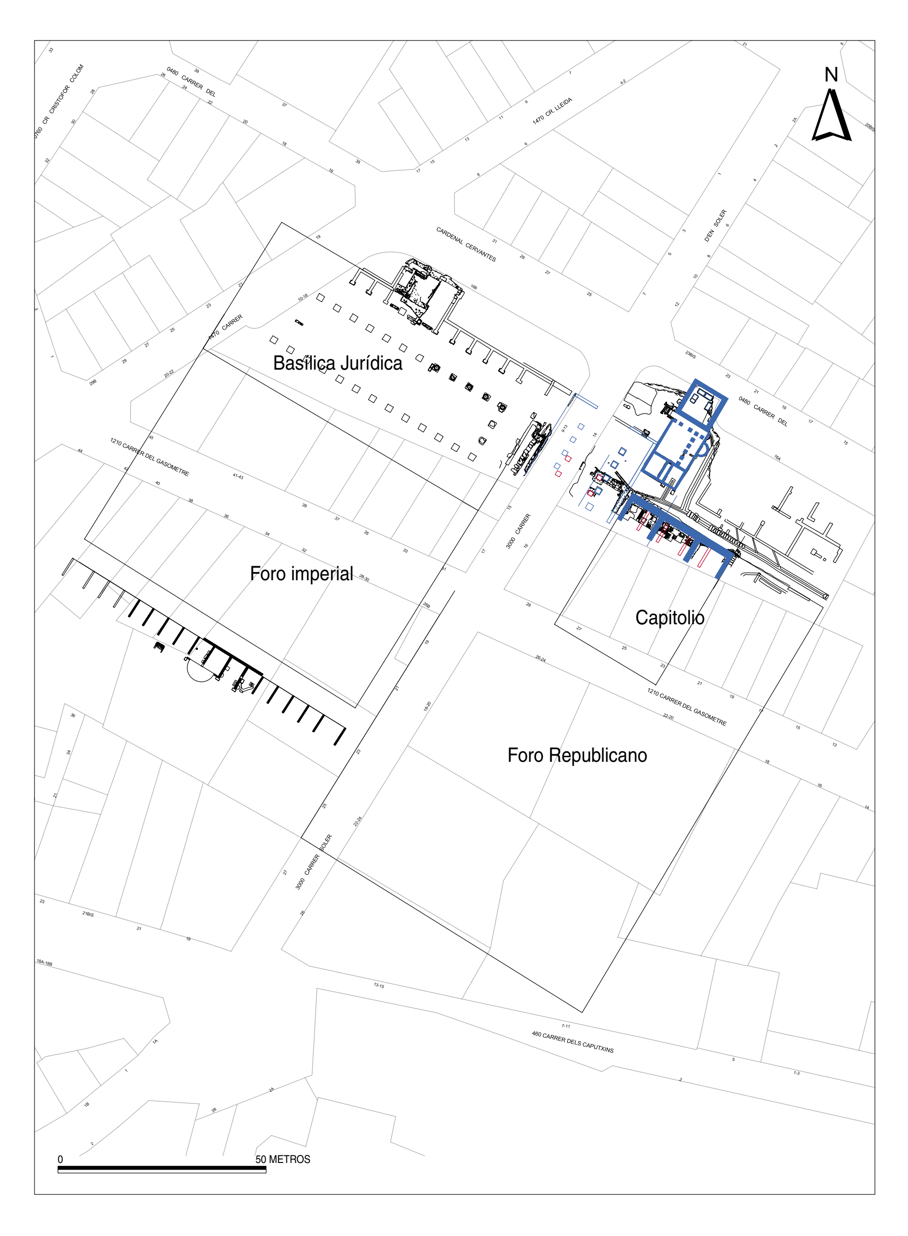
En 1969, el sector fue reconstruido y ajardinado con este aspecto de plaza porticada. Sin embargo, la investigación ulterior, en los años ochenta, emprendida por Ricardo Mar y uno de los autores (Ruiz de Arbulo) posibilitó la identificación correcta de los restos: se trataba de una gran basílica jurídica, un edificio cubierto, de tres naves, construido en época de Augusto (27 a.C.-14 d.C.) como sede del tribunal de justicia y lugar de encuentro para los hombres de negocios que frecuentaban el foro. Puesto que *Tarraco* era al mismo tiempo cabeza de un *conventus iuridicus* (distrito judicial) y capital de la provincia, el gobernador impartía también justicia en este edificio convertido en tribunal supremo del ámbito provincial.

La investigación arqueológica se ha ampliado ahora al sector lateral. En uno de los márgenes del área arqueológica, junto a una calle romana enteramente reconstruida en los años sesenta, aparecían los cimientos irregulares de un enorme podio que nunca habían sido investigados.

Nuestros trabajos han permitido descubrir aquí una importante secuencia arqueológica, que se inicia en el siglo II a.C., con cuatro ámbitos alineados y pavimentados con mosaicos de *opus signinum* pertenecientes a una casa señorial o bien a un primer edificio de culto. A principios del siglo I a.C., los restos fueron cortados limpiamente para construir las zanjas de cimentación de un gran templo, realizado íntegramente en sillería; presidía una primera plaza pública abierta hacia el sur.

La planta de este templo muestra tres cellas centrales y dos naves laterales, correspondiente a la parte trasera de un templo con pórticos laterales y muro de cierre trasero (*peripteros sine postico*). Se trata del primer edificio público documentado en la Tarragona romana, testimonio del primer foro de la ciudad.

En un momento posterior, ya en época imperial romana, el templo fue totalmente reconstruido con nuevas cimentaciones realizadas en hormigón (*opus caementicium*). Muestra, de nuevo, una planta de tres cellas correspondiente a un gran templo próstilo y pseudo períptero. La planta



1. Planta del foro de Tarraco superpuesta a la trama urbana actual.



2. Foro vertical. A la izquierda, basílica jurídica. A la derecha, calle romana, viviendas y parte trasera del capitolio.

de tres cellas nos faculta para identificar con seguridad este templo como un capitolio. Desde la proclamación de la República en el año 509 a.C., el capitolio de Roma, sede del culto a Júpiter, Juno y Minerva, la tríada capitolina, fue el templo principal del estado romano; por ello, su presencia era obligada en todas las colonias y municipios.

Joaquín Ruiz de Arbulo
Universidad de Lérida

David Vivó
Universidad de Gerona

El agua, ¿un recurso abundante o escaso?

Econometría

El agua es uno de los recursos naturales más abundantes de nuestro planeta. Alguien podría incluso haber dicho que jamás se convertiría en un bien escaso, en el sentido económico de la expresión. Si pensamos, además, en la cantidad existente y consideramos el ciclo hidrológico, parece cuanto menos difícil *gastarla*. Nos hallaríamos, pues, ante un recurso renovable a nivel global, aunque no a nivel local.

Si hay escasez de agua, no es por una cuestión de cantidad, sino de calidad. Se estima que 1400 millones de personas carecen de acceso directo al agua potable. A escala mundial, la contaminación del agua representa un problema económico de proporciones inquietantes.

El suministro residencial de agua presenta unas características especiales que lo convierten en una mercancía única. En cuanto a la oferta, se han de tomar en cuenta las llamadas *externalidades*, es decir, los perjuicios ocasionados a terceros, lo mismo en el consumo que en la producción; también debe entrar en consideración su carácter de "monopolio natural" (su provisión sólo resulta rentable cuando se encarga de ella una sola compañía), y, por fin, la indivisibilidad de la inversión.

También la demanda de suministro ha merecido la atención de los economistas en los últimos años. Ha ganado terreno la tesis de que la escasez de agua ha de solucionarse con una moderación de la demanda, no con un aumento de la oferta. Se acepta también que el conocer la respuesta de la demanda ante las variaciones de los precios (la "función de demanda") constituye un requisito esencial para buscar el nivel más eficiente de suministro. Por éste se entiende el nivel que maximice la suma del excedente del productor y del excedente del consumidor e internalice todas las posibles externalidades (es decir, que al calcular el nivel más eficiente se tengan en cuenta éstas), lo mismo en la producción que en el consumo.

Si no se sabe cuál es la función de demanda resulta imposible calcular el precio del agua que haría que la cantidad suministrada de agua fuese "eficiente en el sentido de Pareto", así llamada en honor de Vilfredo Pareto (1848-1923). Cuando se cumple esta condición, la cantidad suministrada no puede modificarse para mejorar el bienestar de un agente económico sin que empeore el bienestar de algún otro. Su incumplimiento, pues, constituiría un desperdicio: podría mejorarse el bienestar de alguien sin perjuicio para nadie.

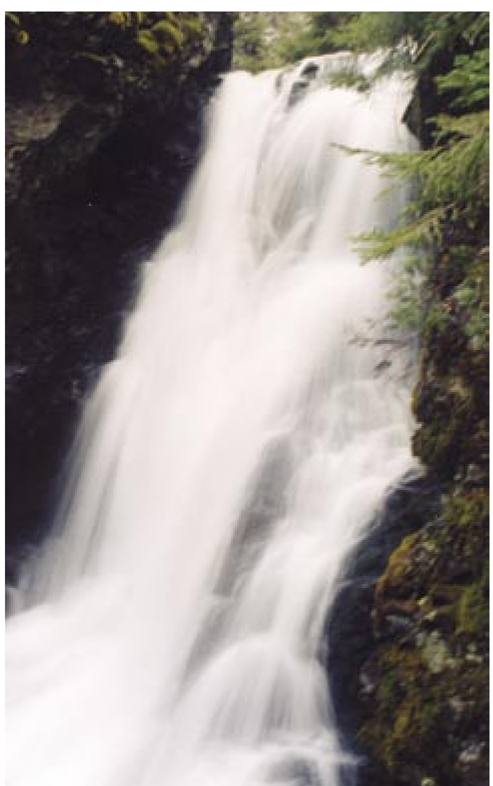
Los esfuerzos de los economistas por explicar la demanda residencial de agua revelan que ésta es inelástica, aunque no perfectamente inelástica. Esto significa que una variación de precio resultará en una variación, en sentido contrario, de la cantidad demandada menos que proporcional. En tal caso, la reducción del precio reducirá los ingresos del suministrador y un incremento los aumentará. La sensibilidad del uso a los cambios de precio depende también de la es-

tación del año y del tipo de uso. Es de esperar que exista un componente mínimo de consumo, muy poco sensible a las variaciones del precio, que sólo podría reducirse con cambios en la instalación y grifería domésticas. La cantidad demandada de agua se muestra, asimismo, sensible al nivel de renta: la elasticidad-renta (la variación de la demanda en función de la renta de los consumidores) suele ser positiva —los más ricos demandan más agua— y mayor que la elasticidad-precio.

Son varias las dificultades a las que el económetra se enfrenta a la hora de estimar las funciones de demanda. Citemos algunas. De entrada, el agua suele venderse bajo tarificación no-lineal: no guarda una proporción directa con los litros gastados. Tiene ello que ver con el carácter de monopolio natural del suministro.

En efecto, en muchas circunstancias, el coste de fabricar una unidad más de un producto es creciente. El proveedor ofrecerá una unidad más del producto a un precio dado mientras éste siga siendo mayor que el coste de fabricar esa unidad adicional (su "coste marginal"). Por lo tanto, el precio tenderá a igualar el coste marginal. Esa será la situación en un mercado competitivo, la más ventajosa para los consumidores. Ahora bien, los monopolios naturales se caracterizan porque disminuye el coste de producir una unidad más. Así no es posible la competencia: el concurso de otros productores reduciría su cuota de mercado, con lo que tendrían que enfrentarse a costes de producción marginales cada vez mayores. Un monopolio natural, pues, no podrá tarifar su producto al coste marginal, ya que éste es inferior al coste medio de todas las unidades ofrecidas.

Bajo tarificación en bloques de consumo —una forma muy frecuente de tarificación no-lineal— es difícil especificar de manera adecuada el precio en función de la demanda. Los trabajos más recientes emplean la combinación de dos variables: la variable *precio marginal* y la variable *diferencia*. Con la primera se indica el precio del último litro de agua gastado. La variable *diferencia* se añade para representar el "efecto renta" impuesto por la estructura de la tarifa.



La variable diferencia, específica para el caso de las tarifas múltiples (o las que usan una cuota fija, un mínimo de consumo o ambas cosas), es la diferencia entre la factura total y lo que el usuario habría pagado si todas las unidades se cobrasen al precio marginal. Tal variable capta solamente el "efecto-renta" de la tarifa: un cambio en su valor sería teóricamente equivalente a un cambio en la renta del usuario. El precio marginal, en cambio, abarca sólo el "efecto-sustitución": la tendencia a transferir el gasto a otro producto cuando el precio sube. Cabe esperar que en el caso del agua ambos efectos sean negativos y débiles.

Cuando se usan datos agregados, es decir, cuando sólo se conoce el total de consumo y el total de usuarios para una zona, en vez del consumo de cada usuario individual, existen diversas formas de introducir esta formulación. Las más correctas teóricamente requieren datos más difíciles de obtener.

Además, la mayoría de los usuarios suelen desconocer el cómputo de la tarifa, cuánta agua consumen en total ni cuánta llevan consumiendo en cada momento del período de cobro. Así, el consumidor podría no reaccionar a la especificación del precio sugerido por la teoría. Entonces, para modelizar la demanda de agua no queda más remedio que recurrir a la investigación empírica.

La estimación de la demanda bajo tarifas en bloque dificulta esta tarea. La demanda depende del precio, pero éste depende a su vez de la demanda. Esta reciprocidad impide que se use el habitual método de mínimos cuadrados para calcular, a partir de los datos empíricos relativos a ambas variables, los parámetros de la función que ligue la demanda al precio. Esa simultaneidad hace que las desviaciones de los valores empíricos de la demanda con respecto a la curva de demanda que se obtenga guarden alguna correlación con el correspondiente valor del precio; esa es la razón técnica de que no se pueden usar los mínimos cuadrados, que requieren que no haya correlación alguna. Para poder calcular la función hay entonces que recurrir a la "estimación mediante variables instrumentales", que calcula los parámetros de la curva de demanda introduciendo unas variables instrumentales definidas de manera que las desviaciones de la demanda con respecto a la curva no estén correlacionadas con ellas.

Otra dificultad reside en la modelización de la elección del bloque de consumo. Normalmente esta elección se obvia y se considera sólo el bloque de la mayoría de los usuarios. Para especificar correctamente la demanda bajo tarifas múltiples, podemos aplicar un modelo en dos pasos: primero se selecciona el bloque de una manera discreta y después se representa la cantidad demandada dentro de ese bloque como una elección continua. Estas técnicas se basan en la noción estadística de "máxima verosimilitud" y requieren al menos una estimación de la distribución de los consumidores por bloques; de ahí que recurran a análisis Probit o Logit, técnicas econométricas que analizan modelos con variables dependientes discretas.

La tarificación en bloques y con mínimos de consumo dificulta el análisis. Si no se tiene en cuenta la forma de la tarifa se generan sesgos,

pero una descripción completa de la elección del consumidor se basa en el supuesto de información perfecta, dificulta el tratamiento econométrico y necesita datos que el investigador normalmente no puede obtener. Sin una correcta especificación de la demanda, es imposible la planificación eficiente del suministro y el bienestar en el mercado de agua no puede ser maximizado.

ROBERTO MARTÍNEZ ESPIÑEIRA
Departamento de Economía
Universidad de St Francis Xavier,
Antigonish, Canadá

Legado medieval

Codex Calixtinus

En la Catedral de Santiago se conserva desde el siglo XII un precioso códice que reúne textos que guardan relación, más o menos directa, con el apóstol Santiago o su santuario. Se puso gran cuidado en su elaboración; sin embargo, es parco en ilustraciones: no tiene más que cuatro miniaturas y numerosas iniciales variadamente decoradas, algunas con efectos singulares.

El manuscrito, copiado probablemente en la propia Compostela hacia 1160, se presenta compuesto en su integridad, aunque recogiendo piezas de otras partes, por el Papa Calixto II (1119-1124) que sería así su gran compilador. Calixto II era tío del rey Alfonso VII de León, y siempre tuvo mucho afecto a Compostela y al obispo Diego Gelmírez. El pontífice concedió a Santiago en 1120 la condición de sede metropolitana, que había disfrutado Mérida. Una dedicatoria que encabeza la compilación va dirigida a Gelmírez (que muere en 1140), y a Guillermo, patriarca de Jerusalén hasta 1145.

La confección del códice parece haberse realizado a través de varias fases. La más antigua (que llevaba el nombre de *Iacobus*) comprendía sólo los tres primeros libros de los cinco que presenta ahora. Ese trío originario tenía un marcado carácter eclesiástico; en conjunto, busca celebrar las reliquias de Santiago en su santuario. El primer libro está formado por sermones para las diversas fiestas jacobeas, algunos obra de clérigos compostelanos (siempre atribuidos a Calixto), otros (hasta 18) sacados de obras de Jerónimo, Agustín, Beda y otros Padres de la Iglesia; el libro dedica gran parte de su extenso contenido a una fastuosa liturgia en honor del apóstol, con oficios larguísimos, que por aquellos años comenzaban a evitarse en otros templos.

El libro II consiste en una colección de 22 milagros de Santiago. Con sus localizaciones se proponía mostrar el poder del apóstol en todas las regiones del mundo, no sólo en la proximidad de su sepulcro, como era lo habitual. Cada milagro va rematado por una consideración moral. Quizá la idea de la compilación se inició con este libro.

El libro III, muy breve, contiene diversos relatos de la traslación del mayor de los hijos del Zebedeo, para justificar su presencia en Compostela, toda vez que constaba (Hechos de los Apóstoles. 12, 2) que Santiago había sido martirizado en Jerusalén en 43 o 44 y, por lo general, los santuarios se elevaban sobre los *martyria*, o lugares de la ejecución.

El descubrimiento, o invención, del sepulcro tuvo lugar hacia 830/840, en tiempos del obispo Teodomiro de Iria (muerto en 847, según su lauda sepulcral, hallada en 1953 en las excavaciones bajo la catedral de Santiago) y de Alfonso II de Asturias (791-842). Por razones dudosas, el hecho se vinculó con Carlomagno (+814), que se convierte en el restaurador del culto jacobeo, construye su iglesia, y la hace episcopal y centro de la Iglesia de España. Esta leyenda constituye la parte primera del libro IV, que recibe ahora el nombre de Historia de Turpín (arzobispo de



Salida de Carlomagno camino de Hispania con su ejército, figurado por diez caballeros que llevan cruz en el casco y la armadura para simbolizar ser cruzados: al final, el emperador, de mayor estatura. Al fondo, con su letrero, en esquema la ciudad de Aquisgrán (*izquierda*). La miniatura, de 150 × 83 mm, se halla en el folio 162 verso del *Codex Calixtinus*. La segunda miniatura, en el mismo folio y del mismo tamaño, representa a Aquisgrán, con el palacio, la capilla palatina y las termas. Seis infantes, quizá supervivientes de la derrota de Roncesvalles, charlan entre sí con dolor, como indica el que se mesa la barba. El tercer registro contenía el largo título original de la *Historia Turpini,* sustituido por esa mancha roja con rasgueos en el siglo XVII. Las dos miniaturas son de estilo inglés con claras influencias normandas. En el folio 163 encontramos, en parte superior, una cartela de fondo verde con el título *Historia Turpini*, en letra y con rasgueos del siglo XVII, necesarios al separarse los folios de la *Historia*. La gran T, con sus entrelazos, encierra un óvalo en que aparece Turpín, de pontifical, con mitra y báculo, en actitud de bendecir. Es el comienzo de la carta dedicatoria de la obra a Leoprando, deán de Aquisgrán.

Reims durante 47 años, a lo largo de la segunda mitad del siglo VIII). En ella se presenta primero a Carlomagno conquistando España, que libera del poder árabe; en segundo lugar, según la épica contemporánea, se presenta a Roldán, la rota de Roncesvalles, y su muerte; en tercer lugar figuran unos textos de Calixto con la muerte de Turpín, herido en la batalla, y una incitación a la peregrinación.

El libro V, conocido como "Guía del Peregrino", responde a la invitación calixtina. Presenta en su primera parte descripciones varias del Camino francés, sus pueblos, ríos, gentes y santos que se han de venerar en él, incluyendo los sepulcros de los héroes épicos en su condición de mártires (como propaganda indirecta de la cruzada española). En la segunda parte se describe la ciudad de Santiago y su catedral.

El códice contiene, además, un apéndice en que figuran muchas piezas musicadas, incluido el primer ejemplo europeo de canto a tres voces.

El manuscrito fue objeto de retoques antiguos, que alargaban episodios de la Historia de Turpín. Luego se sacaron varias copias, de las que algunas no es seguro que dependan del manuscrito guardado en Compostela; nos referimos a los manuscritos de Alcobaça (ahora en Lisboa), Ripoll (hoy en Barcelona, copiado en 1173 por el monje Arnaldo de Monte) y Salamanca. En el siglo XIV se producen dos copias más, muy fieles, hoy en el Vaticano y Londres. Todavía en el siglo XVI se sacó otra, incompleta, que se guarda en Madrid.

En tiempos del arzobispo San Clemente (comienzos del siglo XVII) se desgajó el libro IV, la Historia de Turpín, por su contenido vejatorio para la historia nacional. Se retocó el códice, para que el libro V pasara a ser IV, y se estropeó el comienzo del libro separado. Se reintegró a su forma original al restaurarse en 1966.

Son numerosas las interpretaciones que suscita el *Codex* (llamado con frecuencia *Liber sancti Iacobi*), pues hay quien piensa que se trata de una superchería integral, hecha para la enseñanza en una escuela francesa de léxico, retórica y composición. Muchos suponen que la compilación fue obra de un tal Aymerico Picaud, poitevino, disimulado bajo el seudónimo de Calixto. El nombre de Aymerico aparece en una bula de Inocencio II, falsificada, inserta al final del volumen. Otros creen que se elaboró íntegramente en Compostela, con materiales de otras procedencias, para justificar las reivindicaciones de la Iglesia compostelana. Bajo el amparo del nombre de un Papa, favorecedor de Santiago de Compostela, se libraría de las continuas suspicacias de Roma.

Se trata, en definitiva, de una pieza capital en los estudios compostelanos y medievales. Guarda infinidad de piezas y materiales que representan en el siglo XII la pujanza de Santiago, y los caminos no siempre rectos en que su prestigio se asentaba. Constituye, desde luego, el mejor conjunto documental que se conserva de ningún santuario europeo.

La primera edición moderna del texto íntegro se debe a Walter Muir Whitehill; bastante deficiente, se publicó en Santiago en 1944. Muy cuidada, en cambio, fue la edición de Klaus Herbers y Manuel Santos Noia, que apareció también en Santiago en 1998. Por último, el lector dispone de un estudio histórico-descriptivo en la obra *El Códice Calixtino de la Catedral de Santiago*.

MANUEL C. DÍAZ Y DÍAZ
Universidad de Santiago de Compostela

Transición demográfica en México

Cambios, ajustes y desafíos en la familia rural

La familia constituye una célula central en la organización y el funcionamiento de la sociedad. Se trata de una institución que se adapta a los cambios sociales y, viceversa, la sociedad se ajusta a los cambios familiares. En la transformación de la institución resultó determinante el factor demográfico.

La transición demográfica por la que atraviesan las sociedades modernas altera la estructura y composición de la familia tradicional. Los cambios en la fecundidad y en la mortalidad se han traducido en una disminución de la natalidad y un aumento de la esperanza de vida, que prolonga el tiempo de coexistencia entre generaciones y explica que en algunos hogares convivan cuatro o incluso cinco generaciones.

En los países desarrollados, esta reducción de las tasas de natalidad y mortalidad ha sido lenta y progresiva. De forma paulatina se han producido también los ajustes sociales y familiares en el transcurso de los siglos. En los países en vías de desarrollo, en cambio, los cambios demográficos están teniendo lugar en un corto período de tiempo, lo que implica ajustes rápidos y drásticos. Tal es el caso de México, donde la transición demográfica se registró en la segunda mitad del siglo XX: de 16,5 millones de habitantes en 1930 se pasó a cerca de 100 millones en 2000. La reducción de la mortalidad ha alargado la esperanza de vida: de 36 años a 74. Los cambios en la natalidad han reducido el promedio de hijos por mujer de 7 a 2,2 en ese mismo intervalo temporal.

Las consecuencias de estos cambios demográficos para la sociedad son profundas, sobre todo en el mundo rural. En los pueblos esos cambios han trastocado por completo el sistema de organización y sucesión de la familia, tradicional, basada en arraigados modelos culturales.

La función y la posición de cada miembro venían determinadas por el sexo y el orden de nacimiento. Prevalecía un modelo patrilineal jerárquico. El padre apoyaba a los hijos varones, mientras que las hijas al casarse se desligaban del hogar paterno. Los hijos mayores, al alcanzar cierta edad, comenzaban a trabajar y a participar en el mantenimiento de la familia. En la medida en que un nuevo hijo empezaba a trabajar, el mayor iba siendo liberado de esta responsabilidad familiar y adquiría autonomía, gozando del apoyo del padre. Así se desarrollaba el ciclo familiar hasta llegar al menor de los hijos, el ultimogénito, que permanecía en el hogar paterno y sucedía al padre.

El ultimogénito recibía la casa paterna y la mayor parte de la herencia; a cambio, le correspondía hacerse



1. Familia tradicional mexicana en la primera mitad del siglo XX.

cargo de los padres durante la vejez. El relevo se producía de una manera armoniosa: dado que la esperanza de vida del padre no era muy elevada y existía cierto espaciamiento de edad entre los hijos, el retiro del padre coincidía con el inicio de la vida laboral del hijo menor.

En poco más de una generación y en razón de la transición demográfica, el modelo se ha resquebrajado. Por un lado, ha caído el número de hijos, que ya no se procrean a lo largo del ciclo de vida familiar, sino en los primeros años de matrimonio. Por otro, la esperanza de vida se ha prolongado de forma notable, con lo que el padre retiene el control sobre el patrimonio familiar durante más tiempo y retrasa el traspaso de la herencia a los hijos. En las condiciones demográficas actuales, la vida laboral del último hijo empieza cuando el padre tiene entre 40 y 50 años, lo que significa que le quedan aún, en promedio, más de 20 años de vida. Por tanto, si el traspaso del patrimonio y el relevo generacional se hace de acuerdo con el modelo tradicional, es decir, cuando el padre fallece, este hijo deberá permanecer bajo la autoridad paterna al menos 20 años más y no accederá a la jefatura familiar hasta los 40 años de edad. Es decir, las generaciones que antes se seguían, ahora se superponen. Se altera así el sistema hereditario y su función en la sucesión generacional.

Una de las consecuencias de esta nueva situación en las familias rurales es la emigración de los hijos y la búsqueda de alternativas a la explotación familiar. Muchas de las regiones y estados mexicanos que se habían mantenido al margen de la migración hacia los EE.UU., sobre todo en el sur del país, donde el porcentaje de población rural es mayor, se han incorporado masivamente al flujo laboral en los últimos decenios. Los desplazamientos de larga distancia y duración modifican el sistema de relaciones intergeneracionales, pues al instalarse los hijos al margen de la explotación paterna y sin el apoyo de la familia, tienden a independizarse de la misma. A largo plazo, esta situación conlleva un grave riesgo para los padres: la carencia de un sistema público de pensiones y la ausencia de los hijos pueden convertir la vejez en una etapa de precariedad extrema.

Ante esta situación, los padres se ven forzados a reestructurar la organización familiar. Primero, deben establecer relaciones más igualitarias con los hijos varones, es decir, "contratos" de colaboración a largo plazo que permitan mantener los lazos de unión y los intercambios. Segundo, en aquellas familias que no cuentan con el respaldo de los hijos varones, las hijas entran en el juego de relaciones intergeneracionales, más aún cuando, en este nuevo contexto de movilidad, ellas se incorporan al mercado laboral y se convierten en un agente económico importante.

Se asiste, pues, a una profunda transformación de la relación entre géneros y generaciones en la familia rural mexicana. La transición demográfica ha impulsado un trato más igualitario entre el padre y los hijos varones; ha contribuido también a que la mujer ocupe una posición de mayor relevancia dentro de la estructura familiar.

Alberto del Rey Poveda
Dpto. Economía e Historia Económica,
Universidad de Salamanca



2. Cuatro generaciones coexisten en una familia rural mexicana de finales del siglo XX.

FUENTE: IMAGENES DE LA MEMORIA AGRARIA, CATALOGO ELECTRONICO DE FOTOGRAFIAS DEL ARCHIVO GENERAL AGRARIO, VOL. 1, CIESAS-RAN, MEXICO (*arriba*); MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGIA, MEXICO (*abajo*)

Cambios climáticos

Los glaciares de la Patagonia

Los glaciares de Patagonia, en el sur de Chile y Argentina, están sufriendo cambios que no tienen precedentes históricos. Su retroceso y adelgazamiento, a una velocidad que se ha duplicado en las últimas décadas, ha contribuido significativamente al aumento global del nivel del mar.

Estudios recientes, llevados a cabo por científicos chilenos y de la NASA, concluyeron que los Campos de Hielo Patagónicos Norte y Sur, que abarcan una superficie de 17.000 km^2, aportan el 9 % de la parte del aumento global del nivel del mar generada por todos los glaciares del planeta (excluidas Groenlandia y la Antártida, a las que se considera casquetes de hielos). Esta cifra es desproporcionadamente alta: entre los dos Campos de Hielo suman sólo el 3 % de la masa de los glaciares mundiales.

Este fuerte proceso de deglaciación se explica por los cambios climáticos observados en diversas estaciones meteorológicas ubicadas en ambas vertientes de los Andes patagónicos. Allí se han detectado aumentos de las temperaturas atmosféricas superficiales durante el último siglo a unos ritmos que se han duplicado en los últimos 30 años, llegando a 0,021 ºC por año en la ciudad de Punta Arenas, en el sur de Chile. Este calentamiento también está afectando a altitudes mayores, en particular a 850 hectopascales (hPa) de presión o unos 1400 metros de altura, donde se ha detectado un aumento de temperatura del orden de 0,5 ºC en los últimos 40 años. Más o menos a esa altura se encuentran las líneas de equilibrio, las que separan las zonas de acumulación y de ablación, de la mayoría de los glaciares de Patagonia (coinciden con la altura máxima de la línea de nieve al final del verano austral). El calentamiento atmosférico observado lleva, pues, a una reducción de las zonas de acumulación y por ende, a una menor cantidad de nieve disponible para que se transforme en hielo. Esto último se ha agudizado en Patagonia, donde se han detectado fuertes anomalías en las precipitaciones durante los últimos 40 años, con tendencias generales de reducción de los montos anuales de hasta un 20-25 % y un aumento de la precipitación líquida en altura.

Con estas tendencias climáticas, los glaciares patagónicos han experimentado una mayor frecuencia de años con balances de masa negativos (la diferencia entre la acumulación anual de nieve que ingresa en un glaciar y la pérdida de nieve y hielo que se da al final de un año de calendario, que cae en el verano austral). La consecuencia ha sido el retroceso de sus lenguas terminales. Debido a que el hielo fluye y se desplaza desde las zonas altas, la reacción de los glaciares no es inmediata; pueden pasar varios años antes de que el frente de un glaciar avance o retroceda ante las nuevas condiciones. En este mismo sentido, no todos los glaciares responden en forma lineal a los cambios climáticos y pueden darse excepciones, sobre todo cuando se trata de glaciares desprendentes.

La mayoría de los glaciares patagónicos tienen la particularidad de presentar frentes "desprendentes", que arrojan témpanos a lagos y fiordos. Se piensa que los glaciares de este tipo son más sensibles a los cambios climáticos que los glaciares de montaña sin desprendimiento de



1. Frente terminal del glaciar Tyndall en el Lago Geikie, que se halla en el Campo de Hielo Patagónico Sur, parque nacional Torres del Paine, Chile. Este glaciar ha experimentado un adelgazamiento promedio de 3,2 ± 0,6 metros por año entre 1975 y 2002.

2. El glaciar Greve, del Campo de Hielo Patagónico Sur, presenta un frente en el lago homónimo creado por el avance del vecino glaciar Pío XI, que embalsó un valle de más de 200 km^2 de superficie.

témpanos; sin embargo, cuando cambios climáticos como los vistos en Patagonia sacan a un glaciar de su equilibrio, puede que sufra grandes transformaciones no directamente relacionadas con el clima, sino con las características dinámicas del hielo.

En la segunda mitad de la década de 1990, varios glaciares patagónicos experimentaron el colapso de sus lenguas terminales, con producción masiva de témpanos y retrocesos frontales de varios kilómetros en pocos meses o incluso días, tal como ocurrió en 1997 con los glaciares Grey, del parque nacional Torres del Paine de Chile, y Upsala, del parque nacional Los Glaciares, de Argentina. Desencadenan este tipo de retrocesos espectaculares las características topográficas que rodean a los glaciares; en concreto, puede haber grandes profundidades en los lagos donde los glaciares desprenden hielo; la mayor, los 836 m medidos recientemente en el lago O'Higgins, cerca del frente del glaciar homónimo. En la medida en que el adelgazamiento de los glaciares se siga acelerando, como ha venido ocurriendo en decenios recientes, con tasas de 2 a 11 metros por año, algunos glaciares ubicados en fiordos o lagos muy profundos se acercarán al punto de flotación. Entonces, y debido a la condición temperada del hielo en Patagonia, puede que se produzca un retroceso catastrófico (los glaciares temperados son aquellos que presentan una temperatura del hielo cercana al punto de fusión).

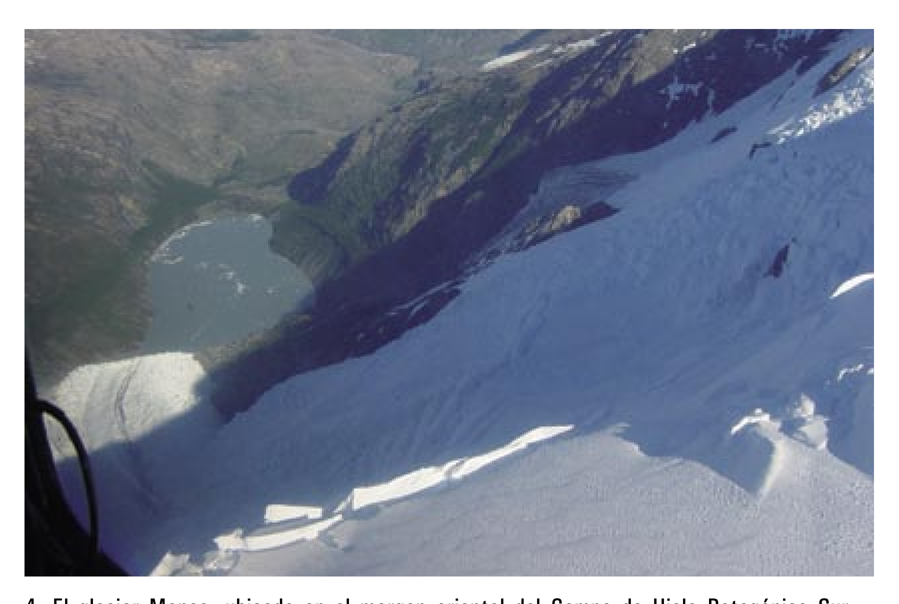
Si bien se perciben retrocesos y adelgazamientos en la mayoría de los glaciares patagónicos, no todos han respondido de la misma forma. Hay uno que incluso avanzó. Se trata del glaciar Pío XI o Brüggen, el más grande del Campo de Hielo Patagónico sur, con 1250 km^2 de superficie y 65 kilómetros de largo, que entre 1945 y 1994 ganó cerca de 9 kilómetros, destruyendo a su paso árboles de hasta 400 años de edad. Otros glaciares, como el Perito Moreno, han presentado un equilibrio de sus frentes, con retrocesos menores y avances ocasionales como el ocurrido a finales de 2003, cuando el glaciar embalsó el Brazo Rico del Lago Argentino, lo que provocó, en marzo de 2004, una ruptura espectacular del frente del glaciar cuando el lago embalsado con cerca de 10 metros de desnivel con respecto al lago principal, se vació violentamente. Estas respuestas "anómalas" frente a los cambios climáticos recientes se deben a las características locales de los glaciares desprendentes, cuya dinámica particular puede llegar a ser más importante que la tendencia climática general. Sin embargo, de continuar las tasas de calentamiento observadas en Patagonia, no cabe duda de que incluso estos glaciares comenzarán a retroceder.

En síntesis, durante la última década se ha progresado mucho en el conocimiento de los Campos de Hielo Patagónicos, gracias, entre otros factores, al advenimiento de los satélites espaciales, que han permitido estudiar una de las zonas más inaccesibles, inhóspitas y bellas del planeta. Sin embargo, aún queda mucho por conocer e investigar, en particular habida cuenta de que los cambios climáticos que están produciéndose en la región pueden destruir registros milenarios almacenados en el hielo y traer consigo otros cambios locales y globales de envergadura aún desconocida.

ANDRÉS RIVERA
Centro de Estudios Científicos,
Valdivia, Chile



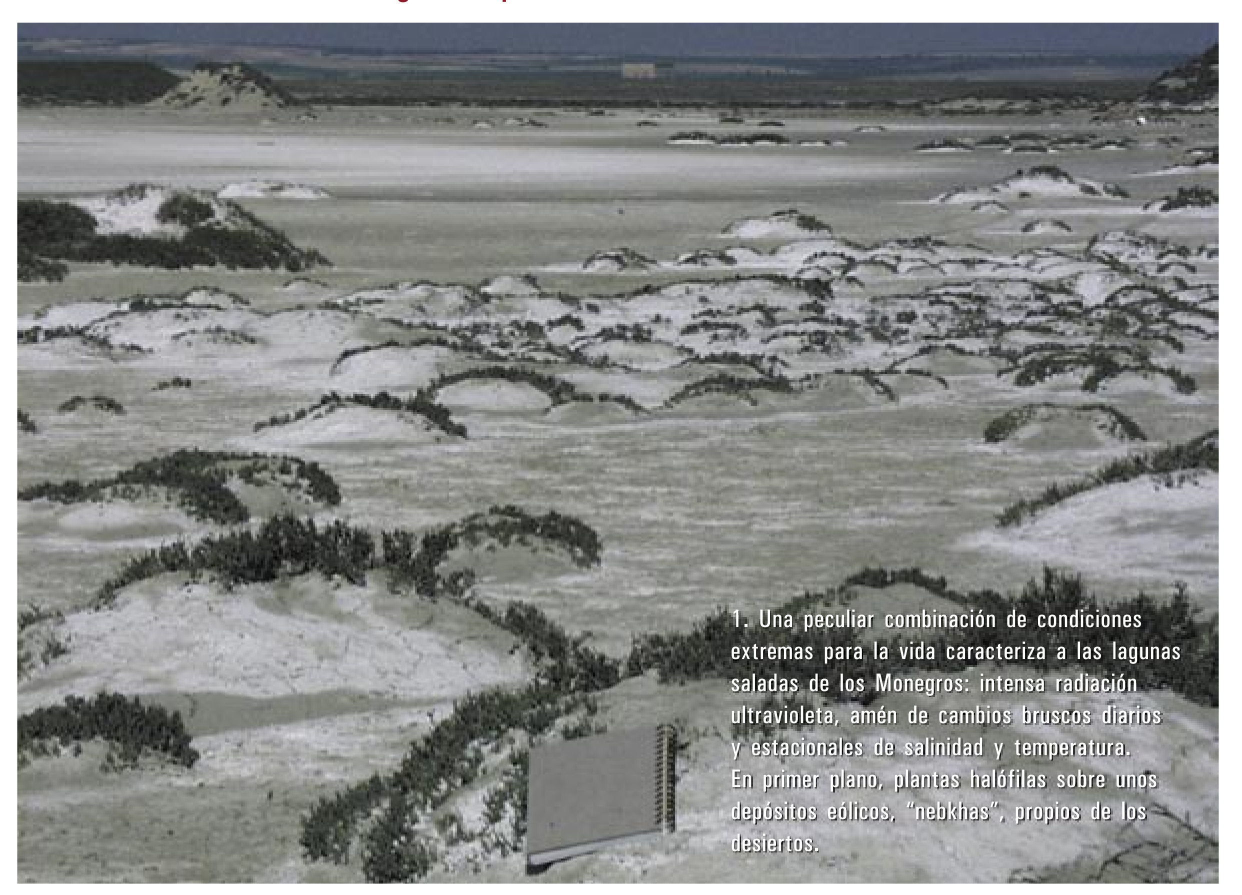
3. Lengua terminal del glaciar San Quintín, en el margen occidental del Campo de Hielo Patagónico Norte. Desde 1993, el frente ha retrocedido aceleradamente. Donde la lengua se derrumba y transforma en miles de témpanos se ha generado un lago proglacial.



4. El glaciar Manso, ubicado en el margen oriental del Campo de Hielo Patagónico Sur. Este es uno de los glaciares estudiados en la campaña realizada por científicos chilenos y de la NASA en noviembre y diciembre de 2002, a borde de un avión Orión P3 de la Armada de Chile equipado con numerosos sensores de prospección geofísica.

Emilio O. Casamayor, Carmen Castañeda, Alicia Pena Baixeras,
M.ª Angels Vich Homs y Juan Herrero Isern

Monegros: riqueza escondida en la sal del desierto



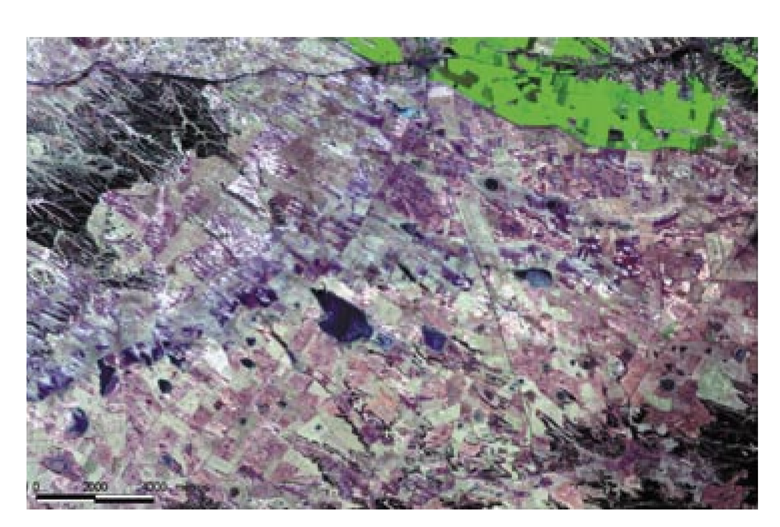
1. Una peculiar combinación de condiciones extremas para la vida caracteriza a las lagunas saladas de los Monegros: intensa radiación ultravioleta, amén de cambios bruscos diarios y estacionales de salinidad y temperatura. En primer plano, plantas halófilas sobre unos depósitos eólicos, "nebkhas", propios de los desiertos.

El complejo endorreico de Bujaraloz-Sástago, en la comarca de los Monegros, contiene más de un centenar de depresiones cársticas, donde se forman humedales salinos. Algunas depresiones son del tipo "lagos-playa", similares a las de otros desiertos de América y norte de Africa. Suelen tener agua de forma estacional y pueden estar parcial o totalmente ocupadas por vegetación halófila.

En ese entorno salino, de procesos geológicos peculiares y singulares adaptaciones de animales y plantas, hallamos un ecosistema sin par en Europa, caracterizado por una biodiversidad única con sus 6000 especies inventariadas.

Mucho menos conocidas son la biodiversidad y adaptaciones de los microorganismos extremófilos de esos humedales salinos. Invisibles al ojo humano, en el volumen de una cucharadita de agua de las lagunas viven cientos de millones de microorganismos. Sabemos ya que más de la mitad de esos microorganismos extremófilos constituyen especies nuevas para la ciencia. El avance en su estudio nos ayudará a entender las formas posibles de vida en otros planetas.

Desde una óptica aplicada, esos microorganismos ofrecen un amplio abanico de posibilidades en el mundo farmacéutico (medicamentos), cosmético (cremas y filtros de protección solar) y alimentario (agentes antioxidantes y conservantes naturales). Pero la dulcificación de estos humedales, los vertidos incontrolados y la excesiva presión agrícola alteran gravemente ese tesoro.

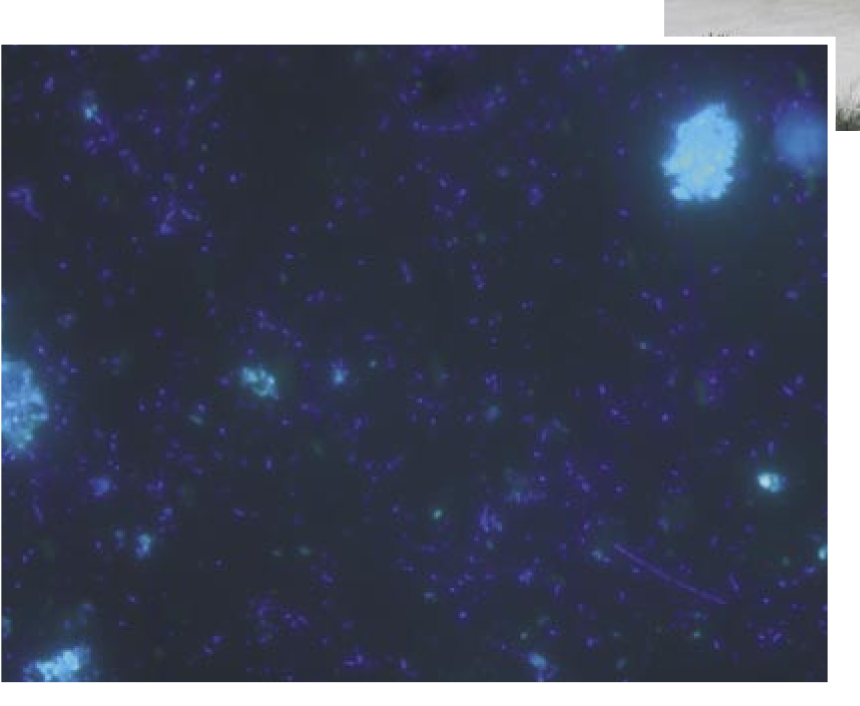


2. Observadas desde el satélite se distinguen decenas de lagunas saladas en la planicie del complejo endorreico de Bujaraloz-Sástago. En la parte superior se observa la zona de regadío (*coloreada artificialmente en verde*) avanzando hacia el sur.



3. Caprichosas y bellas formaciones de sal aparecen tras evaporarse el agua de las lagunas saladas.

4. Las cuencas endorreicas evaporíticas forman un extraordinario paisaje lunar, único en Europa. Bajo este impresionante manto blanco de costra salina medran millones de microorganismos extremófilos.



5. Observación al microscopio de una gota de agua salada de los Monegros. El colorante muestra una gran diversidad de microorganismos extremófilos. Su tamaño oscila entre las centésimas y las milésimas de milímetro.



6. ***Artemia salina*** es un crustáceo de 10 milímetros adaptado a vivir con altas concentraciones de sal. Se trata del depredador por excelencia de algunos microorganismos de estas lagunas.

Orígenes de la complejidad animal

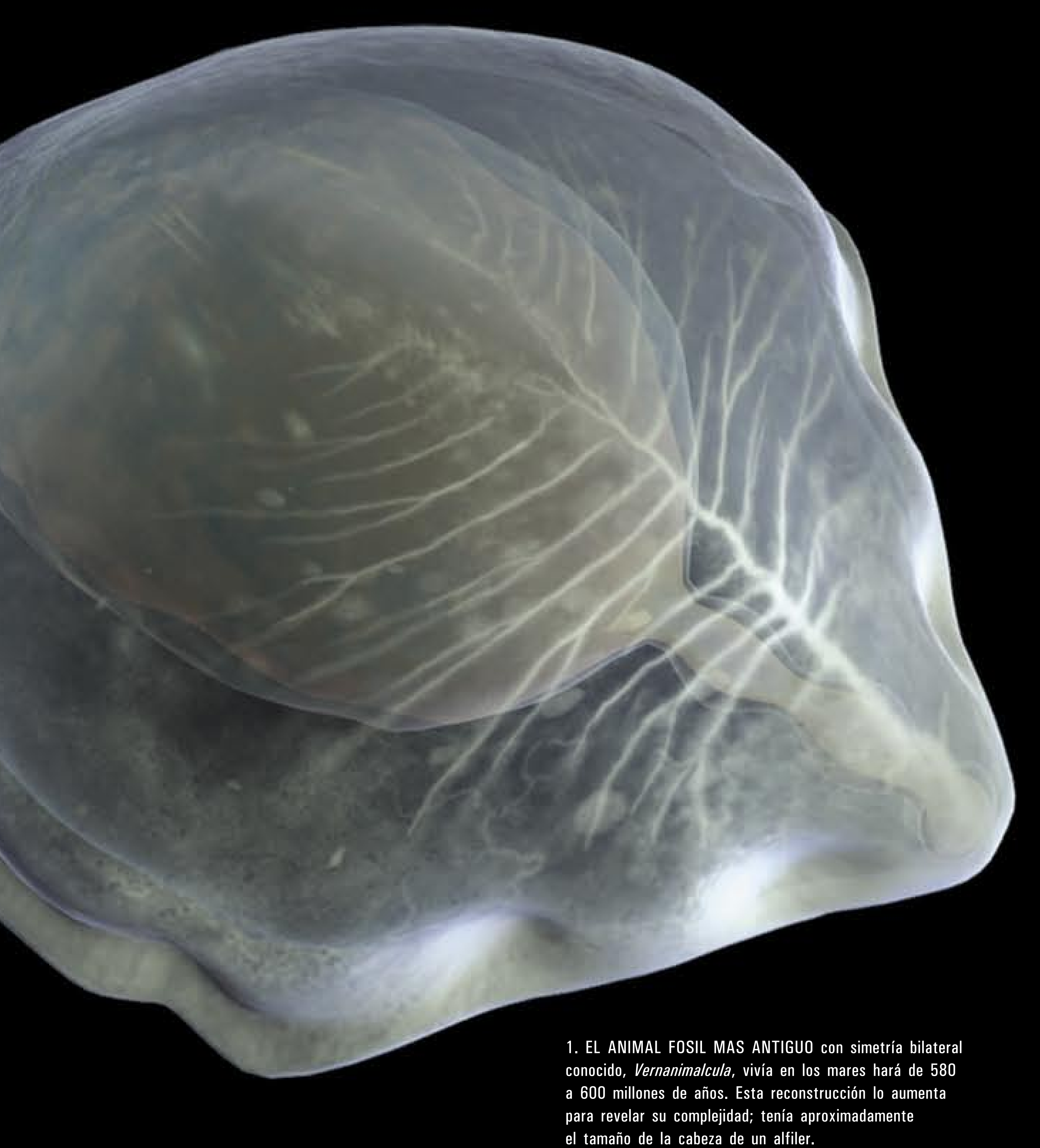
Fósiles minúsculos descubiertos en China revelan que la complejidad animal apareció unos 50 millones de años antes de lo que creían los paleontólogos. Precedió a la explosión del Cámbrico

David J. Bottjer

"En ese camión va un bilateral", me dijo Jun-Yuan Chen mientras el vehículo desaparecía tras un recodo de la carretera. Con Chen, paleontólogo de la Academia China de las Ciencias en Nanjing, y Stephen Q. Dornbos, por entonces en la Universidad de California del Sur, acababa de recolectar un cargamento de rocas negras en un yacimiento de 580 a 600 millones de años de antigüedad, de la provincia china de Guizhou. Chen estaba seguro de que contenían algo importante.

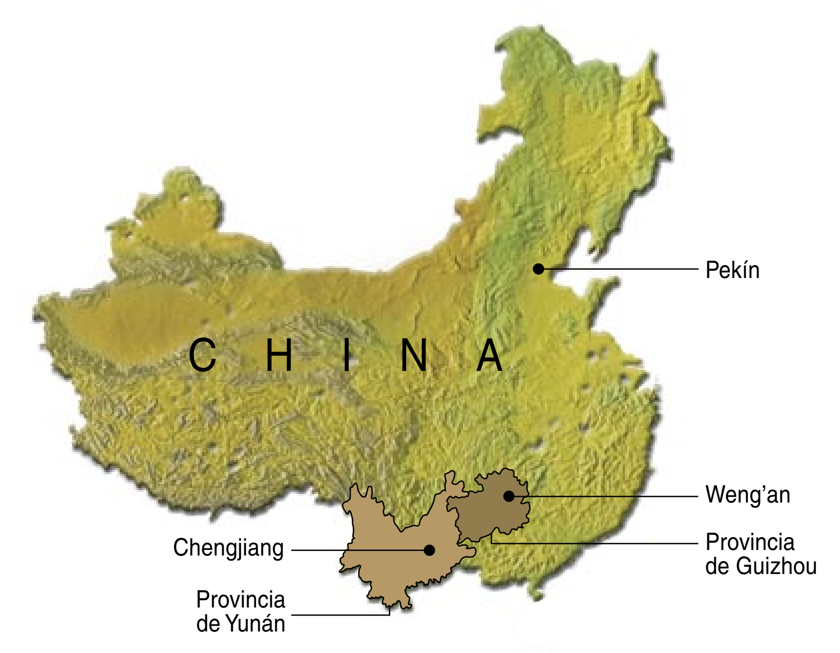
Habíamos ido a Guizhou en 2002. Queríamos dar con fósiles microscópicos de algunos de los animales más antiguos de la Tierra. Esperábamos encontrar un bilateral. La aparición de la simetría bilateral (la correspondencia especular de extremidades y órganos) señala un paso fundamental en la historia de la vida. Los primeros animales pluricelulares no presentaban esa simetría. Se trataba de burujos acuáticos asimétricos (esponjas) que filtraban partículas alimenticias de las corrientes que ellos mismos generaban. Los cnidarios, animales acuáticos de simetría radial, son un poco más complejos; poseen células urticantes especializadas para inmovilizar a sus presas. El resto del mundo animal, de los gusanos al hombre, es bilateral. En un momento u otro de su ciclo biológico, todos exhiben no sólo el equilibrio izquierda-derecha fundamental, sino también un cuerpo estructurado en diversas capas, con boca, tubo digestivo y ano.

Todavía hace poco, se admitía que los animales bilaterales aparecieron en el registro fósil hace unos 555 millones de años, aunque la inmensa mayoría surgiera algo más tarde, en un estallido de innovación, la "explosión del Cámbrico", que empezó hace unos 542 millones de años. La escasez de fósiles anteriores hacía imposible comprobar las teorías acerca de la causa desencadenante de la "explosión", ni siquiera afirmar con seguridad que se produjera tal explosión o bien que se trataba de un espejismo asociado al registro mínimo de trazas de animales anteriores. Pero las investigaciones de los últimos seis años —entre ellas, las nuestras en la provincia de Guizhou— han modificado nuestro conocimiento de ese período. Según parece, los animales complejos surgieron al menos 50 millones de años antes de la explosión del Cámbrico.



1. EL ANIMAL FOSIL MAS ANTIGUO con simetría bilateral conocido, *Vernanimalcula*, vivía en los mares hará de 580 a 600 millones de años. Esta reconstrucción lo aumenta para revelar su complejidad; tenía aproximadamente el tamaño de la cabeza de un alfiler.

AMADEO BACHAR



2. EN DOS YACIMIENTOS CHINOS se han conservado restos de animales de cuerpo blando que proporcionan nueva información sobre las primeras épocas de la evolución. En 2004, el autor y otros paleontólogos descubrieron el animal bilateral más antiguo conocido en unas rocas extraídas de la formación Doushantuo, situada cerca de Weng'an, con una antigüedad de entre 580 y 600 millones de años. Fósiles bastante más jóvenes, hallados en los depósitos cercanos a Chengjiang, de hará unos 525 millones de años, han ampliado nuestro conocimiento de la explosión del Cámbrico.

Relojes moleculares y *Lagerstätten*

El estudio de los relojes moleculares resultó decisivo para establecer la fecha de aparición de los primeros animales con simetría bilateral. El análisis en cuestión se funda en la hipótesis según la cual ciertas mutaciones genéticas se producen a un ritmo regular en el transcurso de millones de años. Las diferencias en el ADN de dos organismos pueden entonces servir de indicador del tiempo, vale decir, nos ofrecen una estimación de la fecha en que dos líneas divergieron a partir de un antepasado común. Luego, cada una seguiría su propio camino y acumularía sus propias mutaciones distintivas.

Para establecer una cronología del origen de grandes grupos zoológicos, Gregory Wray y sus colaboradores, de la Universidad Duke, utilizaron un reloj molecular cuyo ritmo de cambio se dedujo de los vertebrados. Según sus resultados, publicados en 1996, los bilaterales divergieron de animales más primitivos en plena era Precámbrica, hace al menos 1200 millones de años.

Estudios subsiguientes, que se basaban también en el reloj molecular, produjeron estimas para el momento de esta división muy dispares; iban desde hace mil millones de años hasta el límite entre el Precámbrico y el Cámbrico (unos 600 millones de años). Tales discrepancias generaron dudas sobre la fiabilidad de la datación por ese reloj molecular. En un trabajo más reciente, el equipo encabezado por Kevin Petersen, del Colegio Dartmouth, se sirvió de otra cadencia de reloj molecular, derivada de los invertebrados y más célere que la fundada sobre los vertebrados.

Esta investigación situaba al último antepasado común de los animales bilaterales en una fecha mucho más reciente, hace entre 573 y 656 millones de años, aunque anterior también a la explosión del Cámbrico. Pero incluso esta fecha generó controversia. Resultaba claro que sólo los fósiles reales proporcionarían las pruebas incontrovertibles de la época en que surgieron los bilaterales. Ante ese reto, los paleontólogos se pusieron a buscar fósiles de organismos que vivieron antes del Cámbrico.

Pero había un problema: ¿cómo descubrir animales que no habían adquirido un esqueleto rígido capaz de mineralizarse y convertirse en fósil? No había más que una solución. Hallar un yacimiento que, en virtud del tipo particular de rocas que lo integrase y de su contexto geoquímico, conservara detalles sutiles de tales organismos. Estos depósitos se denominan *Lagerstätten*, palabra alemana que significa yacimiento o filón. Un *Lagerstätte* que conserve tejidos blandos es una auténtica rareza: sólo conocemos varias decenas de ellos, repartidos por todo el mundo. Uno de los más famosos es la caliza de Solnhofen, en Alemania, de 150 millones de años de antigüedad, en la que se conservan especímenes de la que se suele considerar el ave fósil más antigua, *Archaeopteryx*. En la Columbia Británica hay un yacimiento anterior, los esquistos de Burgess (Burgess Shale). Contiene una cornucopia de curiosos organismos de cuerpo blando procedentes de los viejos océanos del período Cámbrico que Stephen Jay Gould hizo famosos.

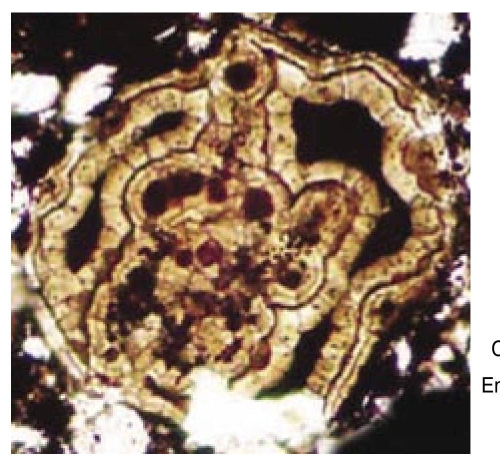
Resumen/Más antiguos de lo que pensábamos

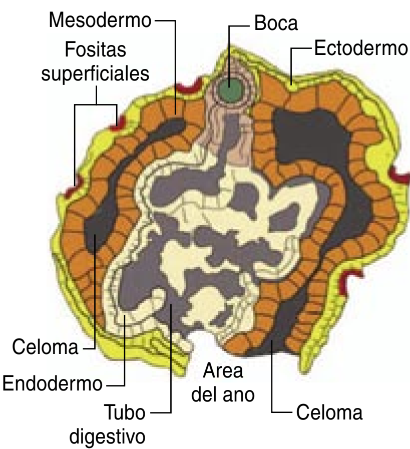
- El desarrollo de la simetría bilateral supuso un paso fundamental en los comienzos de la evolución de los animales.
- Según el análisis genético, la simetría bilateral surgió hace de 573 a 656 millones de años, pero muchas dudas empañaban esa datación. La de mayor peso era la antigüedad de sólo 555 millones de años de los fósiles bilaterales más antiguos encontrados.
- El autor y sus colaboradores han descubierto pruebas fósiles convincentes de una fecha anterior: unos animales microscópicos hallados en yacimientos chinos de 580 a 600 millones de años de antigüedad.
- Los fósiles minúsculos no sólo apoyan una fecha más temprana para el inicio de la vida animal compleja, sino que demuestran también que la evolución produjo la complejidad interna antes que el tamaño grande.

ALISON KENDALL

Más antiguo que Burgess Shale, un *Lagerstätte* situado en el área de Chenjiang, en la provincia china de Yunán, ha proporcionado muchos hallazgos recientes e importantes de organismos de cuerpo blando, característicos asimismo de la explosión del Cámbrico. Y en varios puntos del planeta, los *Lagerstätten* ediacarenses, que reciben este nombre por las colinas australianas de Ediacara donde se encontró el primer ejemplar, albergan madrigueras y extraños fósiles de animales de cuerpo blando procedentes del Precámbrico; éstos incluyen indicios de bilaterales primitivos.

De manera sorprendente dos grupos independientes de paleobiólogos informaron, en 1998, de un hallazgo extraordinario: fósiles de tejido blando en perfecta conservación en la formación Doushantuo, otro *Lagerstätte* del Precámbrico. Este depósito, situado en la provincia de Guizhou, en China meridional, contiene diminutas esponjas y cnidarios de cuerpo blando, así como huevos y embriones minúsculos. Gran parte del sedimento en el que se encontraron está compuesto por apatita (mineral de fosfato cálcico), que ha sustituido con precisión los tejidos blandos originales de estos fósiles. Los últimos estudios demuestran que esas rocas preceden a las de la biota de Ediacara: con mucha probabilidad, tienen de 580 a 600 millones de años de antigüedad. Los microfósiles que alojan vivieron, pues, entre 40 y 55 millones de años antes del Cámbrico.





3. EL EJEMPLAR MEJOR CONSERVADO de *Vernanimalcula* es el que se muestra en la microfotografía de la izquierda. Son evidentes las características diagnósticas de un bilateral: cuerpo con múltiples capas, las cavidades pares del celoma, una boca y un tubo digestivo. El esquema de la derecha destaca los rasgos clave (el ano no se ha conservado en este espécimen; su localización se basa en su situación en otros especímenes).

Y ahora a China

Los paleontólogos no tardaron en advertir que la formación Doushantuo podría ser la ventana a través de la cual se observaran las primeras etapas de la vida bilateral. En el otoño de 1999, varios paleontólogos, incitados por Eric Davidson, biólogo molecular del Instituto de Tecnología de California, nos unimos para estudiar los microfósiles de Doushantuo. En el grupo entraban Chen y Chia-Wei Li, dos de los primeros investigadores que informaron de la existencia de huevos y embriones en la formación Doushantuo. Li, profesor de la Universidad Nacional Tsing Hua, es un experto en biomineralización, y Chen tiene mucha experiencia en el estudio de las primeras etapas de la vida animal por su trabajo pionero en el *Lagerstätte* del Cámbrico inferior de Chengjiang.

Nuestras catas iniciales sugerían que un estrato sedimentario bastante delgado, de color negro, sería el más prometedor para encontrar un amplio repertorio de microfósiles. Otros investigadores del yacimiento, al aplicar ácido en el laboratorio a la matriz rocosa para disolverla, habían hallado diminutos fósiles fosfatizados. Por desgracia, la técnica de disolución con ácido no funcionaba con el estrato de roca negra que habíamos elegido. Por ello adoptamos un método diferente: recolectamos grandes cantidades de esta roca negra y los llevamos al laboratorio de Chen, en el Centro de Investigación de la Vida Primitiva del Instituto de Geología y Paleontología de Nanjing, en la contigua provincia de Yunán. Hacia allí se dirigía nuestro volquete cuando Chen afirmó que llevaba bilaterales.

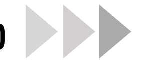
De nuevo en Yunán con nuestras rocas, cortamos las muestras en miles de secciones, tan finas que fuesen translúcidas y, montándolas sobre un portaobjetos de vidrio, se las pudiera examinar bajo el microscopio. Hicimos más de 10.000 de dichas secciones. El análisis minucioso de las preparaciones, que nos ocupó varios años, reveló miríadas de huevos y embriones; confirmó la presencia de esponjas y cnidarios, adultos pero diminutos, de la que ya se había informado previamente.

Pero nuestro verdadero objetivo era encontrar un bilateral. ¿Sería cierto que los había en las muestras del volquete? En el verano de 2003 empezamos a centrarnos en un tipo de microfósiles cuyas características morfológicas complejas nos llamaron la atención en particular. Entre las 10.000 preparaciones, localizamos 10 ejemplos de este tipo y, a principios de 2004, después de meses de análisis, llegamos a la conclusión de que ese minúsculo organismo exhibía los rasgos distintivos de un bilateral.

Pese a su tamaño, entre 0,1 y 0,2 milímetros, impresiona la complejidad de estos fósiles microscópicos. Constituyen un ejemplo de bilateral casi de manual: constan de las tres principales capas de tejido (el endodermo, el mesodermo y el ectodermo), cuentan con un tubo digestivo con boca y ano, y un par de cavidades corporales (del celoma) en torno al intestino. Es probable que este animal oval, que debía de parecerse a una bolita de goma, se desplazara sobre el fondo marino para comer. La boca, en un extremo del óvalo, aspiraría microorganismos. Unas fositas que presenta a cada lado de la boca fueron quizás órganos sensoriales.

Denominamos *Vernanimalcula* a nuestro descubrimiento: "animalito primaveral". El nombre se refiere al

El lugar en la historia de un fósil minúsculo



Antes se creía que la evolución de la vida animal compleja se inició de golpe en el período Cámbrico Temprano, acontecimiento al que a menudo se hace referencia como explosión del Cámbrico. El descubrimiento en 2004 del microscópico *Vernanimalcula* por el autor y sus colegas retrotrae los orígenes de la vida animal compleja hasta 50 millones de años antes del Cámbrico.

Hace 4500 millones de años se formó la Tierra



Hace unos 3500 millones de años surgieron microorganismos unicelulares y tapetes microbianos



Filamentos microbianos

Hace 1200 millones de años se habían desarrollado los primeros organismos pluricelulares complejos



Bangiomorpha

Hace 600-580 millones de años el animal bilateral más antiguo conocido se desplazaba sobre el fondo marino



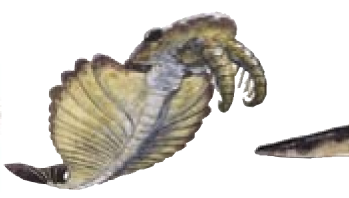
Vernanimalcula

Hace 555 millones de años se habían desarrollado animales bilaterales grandes



Kimberella

Hace 542 millones de años empezó la explosión del Cámbrico



Anomalocaris

ERA PRECAMBRICA

CAMBRICO

largo invierno de la “Tierra bola de nieve”, la época en que los glaciares cubrieron el planeta [*véase* “La Tierra, una bola de nieve”, de Paul F. Hoffmann y Daniel P. Schrag; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2000]: las rocas que contienen *Vernanimalcula* se encuentran un poco por encima de las que marcan el final de aquel episodio glacial.

El legado de *Vernanimalcula*

De la complejidad biológica que exhibe *Vernanimalcula,* se sigue que algún largo período de cambios evolutivos hubo de preceder a la época en que, hará entre 580 y 600 millones de años, vivió ese animal minúsculo. Sin la menor duda, no pudo haber adquirido de golpe semejante grado de simetría y complejidad. Debemos,

El significado real de la explosión del Cámbrico

Por “explosión del Cámbrico” suele entenderse una multiplicación repentina de tipos de animales bilaterales (los que tienen simetría izquierda-derecha de extremidades y órganos). Pero en aquella época ocurrió algo más complicado, y más interesante. La investigación ha puesto de manifiesto que una intensificación espectacular de las interacciones animales desempeñó un papel importante en ese aumento de la diversidad.

En primer lugar, los animales empezaron a modificar el entorno. Las nuevas condiciones crearon, a la vez, oportunidades y barreras para otros habitantes del mundo antiguo. Por ejemplo, los animales del Precámbrico que vivían sobre el fondo del mar estaban adaptados a desplazarse sobre tapetes microbianos almohadillados, que cubrían la mayor parte del fondo y habían formado parte del ecosistema desde que se originó la vida. Sin embargo, al inicio del Cámbrico (que duró desde hace 542 hasta hace 488 millones de años), innovaciones evolutivas permitieron que los animales bilaterales excavaran túneles verticalmente en el sedimento. Las excavaciones destruyeron los tapetes ubicuos y los sustituyeron por una superficie de consistencia blanda e inestable. Algunos organismos, como los helicoplacoides, pequeños animales en forma de peonza que vivían embutidos en el fondo marino, debieron de extinguirse al hacerse ese suelo cada vez más inestable. Por el contrario, otros organismos reaccionaron a este aumento de bioturbación con adaptaciones que les permitían vivir en los nuevos ambientes.

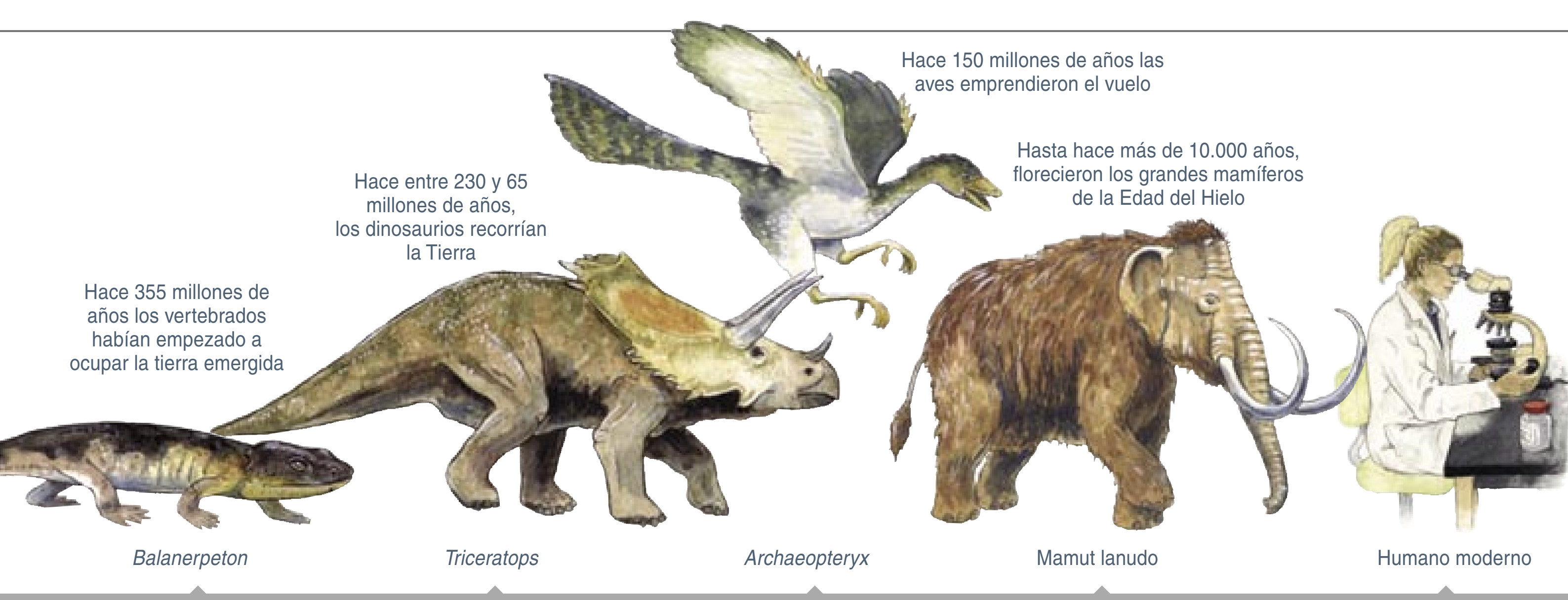
En segundo lugar, el Cámbrico Temprano señala la época en que los paleobiólogos detectan la primera presencia de depredadores bilaterales que habían evolucionado para comer a otros animales. En ese contexto, Jun-Yuan Chen y Di-Ying Huang, de la Academia China de Ciencias en Nanjing, y otros han informado de varios tipos nuevos de depredadores procedentes del *Lagerstätte* de Chengjiang, en China. Entre ellos hay artrópodos con extraños apéndices frontales para capturar presas (*abajo*), así como gusanos excavadores, presentes por doquier, que se desplazaban bajo el sedimento marino y se alimentaban de otros pequeños animales.

Estas interacciones biológicas desempeñaron un importante papel en la evolución temprana de los animales. Pero, como ha aducido Charles Marshall, de la Universidad de Harvard, y como nuestros hallazgos corroboran, es probable que para la época de la explosión del Cámbrico la evolución ya hubiese creado las herramientas genéticas y los mecanismos que forman los patrones característicos de los bilaterales. Así, la “explosión” de tipos de animales consistiría en la explotación de nuevas circunstancias por animales que ya contaban con los medios genéticos para sacar partido de esos hábitats nuevos, y no en un cambio fundamental en la dotación genética de los animales.



EL DEPREDADOR PRIMITIVO *Haikoucaris*, de unos cuatro centímetros de longitud.

AMADEO BACHAR



pues, dar con *Lagerstätten* más antiguos que nos documenten sobre sus antepasados.

Hemos también de proyectarnos hacia delante en el tiempo, para desentrañar lo que les ocurrió a sus descendientes. Lo que sabemos acerca de la vida durante el período que media entre *Vernanimalcula* y los animales de la explosión del Cámbrico, un lapso de entre 40 y 55 millones de años, procede sobre todo de estudios de *Lagerstätten* que contienen la biota de Ediacara: impresiones y moldes de organismos de cuerpo blando considerablemente mayores que *Vernanimalcula*, ya que medían desde unos centímetros hasta un metro.

Los recientes descubrimientos del grupo de Guy Narbonne, de la Universidad de Queen's en Ontario, han confirmado la existencia de estos animales hace 575 millones de años; sin embargo, sólo en ejemplos de 555 millones de años de antigüedad y más recientes encontramos fósiles que parecen representar bilaterales. A diferencia del minúsculo *Vernanimalcula*, estos bilaterales de Ediacara eran organismos macroscópicos. Es el caso de *Kimberella*, un animal marino de cuerpo blando y unos 10 centímetros de longitud, antepasado quizá de los moluscos (bivalvos, caracoles y calamares) de los mares de hoy. Lamentablemente, ningún yacimiento ediacarense que hayamos localizado presenta las características minerales exclusivas que se necesitan para conservar animales microscópicos. Para descubrir si existieron bilaterales microscópicos junto a los animales ediacarenses mayores, hemos de encontrar un yacimiento fósil de edad ediacarense cuya conservación sea similar a la de la formación Doushantuo, más antigua.

Aunque todavía no podemos seguir la pista de los antepasados y de los descendientes de *Vernanimalcula*, estos diminutos fósiles han revelado una etapa crucial de la evolución: demuestran que existió la capacidad de construir un cuerpo complejo sin esperar que hubiera un tamaño grande. Ahora se quiere saber la razón por la que se llegó al cambio de escala. Según la explicación más probable, un aumento drástico en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua proporcionó el acicate: disponer de más oxígeno para la respiración reduce las restricciones de la talla.

Vernanimalcula proporciona sin duda nuevos alicientes a la busca de fósiles de animales de cuerpo blando. Tenemos todavía muchas cosas por descubrir, pero el trabajo realizado hasta aquí ha dado consistencia a nuestra sospecha: las raíces de los animales complejos se hunden más profundamente en el tiempo de lo que se creía. El Cámbrico no fue tanto una explosión de vida animal, cuanto su florecimiento.

El autor

David J. Bottjer, paleobiólogo, ha centrado su investigación en el origen de los animales. Se doctoró en geología por la Universidad de Indiana y en la actualidad es profesor de geología y biología en la Universidad del Sur de California. Es presidente de la Sociedad de Paleontología de Estados Unidos (2004-2006) y dirige la revista *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.

Bibliografía complementaria

CRADLE OF LIFE: THE DISCOVERY OF EARTH'S EARLIEST FOSSILS. J. William Schopf. Princeton University Press, 2001.

EVOLUTION: THE TRIUMPH OF AN IDEA. Carl Zimmer. Perennial (Harper Collins), 2002.

LIFE ON A YOUNG PLANET: THE FIRST THREE BILLION YEARS OF EVOLUTION ON EARTH. Andrew H. Knoll. Princeton University Press, 2003.

ON THE ORIGIN OF PHYLA. James W. Valentine. University of Chicago Press, 2004.



1. LAS FOTOGRAFIAS RESULTAN COMPLICADAS para muchos niños, porque no dominan todavía la representación dual: no comprenden que un objeto simbólico es él mismo (en este caso, una fotografía) y también una representación de otra cosa (una zapatilla). Muchos intentan interactuar con los objetos de las fotografías, como hace éste tratando de meter el pie en la zapatilla.

Desarrollo del pensamiento simbólico

Los niños confunden los objetos reales y el símbolo que los representa. Este y otros errores revelan las dificultades que entraña el aprendizaje de la simbolización

Judy S. DeLoache

Hace unos 20 años, mi investigación dió un giro inesperado y a la vez fructífero. Había estado estudiando la memoria de niños en edad de empezar a andar e iniciaba un ensayo nuevo con críos de entre dos años y medio y tres años. Para el proyecto, había construido una maqueta, a escala reducida, de una de las estancias que integraban mi laboratorio. El espacio real estaba amueblado como una sala de estar: un diván tapizado, un sillón, un armario, etcétera. Los objetos en miniatura de la maqueta eran lo más parecidos posible a sus homólogos de tamaño real: tenían la misma forma y eran del mismo material, tapizados con la misma tela y dispuestos de la misma forma. En el experimento, un niño observaba cómo escondíamos un juguete en miniatura (un perro de plástico al que llamamos "pequeño Snoopy") en la maqueta, a la que nos referíamos como la "habitación del pequeño Snoopy". Luego animábamos al niño a encontrar al "gran Snoopy", una versión en tamaño natural del juguete "escondido en el mismo lugar en la habitación grande". Queríamos averiguar si los niños utilizarían su recuerdo de la sala en miniatura para saber dónde se encontraba el juguete en la sala grande.

Los de tres años lo consiguieron, según presumíamos. Después de observar que el juguete pequeño se colocaba detrás del diván en miniatura, corrían a la sala real y encontraban el juguete grande detrás del diván de verdad. Los de dos años y medio, en cambio, fallaron estrepitosamente, con sorpresa mía y de sus padres. Entraban corriendo, contentos, en la sala para coger el juguete grande, pero la mayoría no sabía dónde buscar, aun cuando recordaban dónde estaba escondido el juguete pequeño en la sala en miniatura y lo encontraban allí con facilidad.

El hecho de que no utilizaran la información que tenían acerca de la maqueta para moverse por la sala real indicaba que se les escapaba la relación entre la maqueta y la sala. Pronto caí en la cuenta de que el ensayo, ideado en principio para estudiar la memoria, en realidad se centraba en la comprensión simbólica. A partir del intento fallido de aquellos niños podíamos ahondar en el cómo y el cuándo se adquiere la capacidad de comprender que un objeto representa a otro.

La capacidad de crear y manejar una amplia variedad de representaciones simbólicas constituye la mayor diferencia entre los humanos y el resto de los animales. Esta aptitud nos permite transmitir información de una generación a otra, desarrollar una cultura y aprender muchísimas cosas sin necesidad de experimentarlas directamente: todos sabemos qué es un dinosaurio, a pesar de no haber visto nunca ninguno. El pensamiento simbólico desarrolla una función esencial en casi todo lo que hacemos. Quizá no haya aspecto del desarrollo humano de mayor importancia que aprender a interpretar símbolos. ¿Cómo empiezan los pequeños a usar y comprender objetos simbólicos? ¿Cómo consiguen manejarlos? Aquellos resultados hicieron cambiar el rumbo de mi investigación: a partir de entonces aparcaría la memoria para centrarme en el pensamiento simbólico.

Dibujos que cobran vida

El primer tipo de objetos simbólicos que se aprende a manejar son los dibujos. A los adultos les parecen símbolos elementales, pero a los pequeños les resultan

RANDY HARRIS

desconcertantes al principio. El problema radica en la dualidad inherente en todos los objetos simbólicos: constituyen una realidad en sí mismos y, al propio tiempo, representan a otra cosa. Es decir, para entenderlos, el observador debe llevar a cabo un doble trabajo cognitivo: debe representar mentalmente el objeto en sí y también la relación entre éste y aquello que simboliza.

Hace unos años llegaron a mis oídos varios relatos que sugerían que los niños no captan la doble naturaleza de los dibujos. Hablaban de bebés que intentaban aprehender una manzana dibujada o meter el pie en un zapato fotografiado. Mis compañeros David H. Uttal, de la Universidad del Noroeste, Sophia L. Pierroutsakos, del Centro Comunitario St. Louis, Karl S. Rosengren, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y yo misma decidimos investigar tales conductas. Suponíamos que éstas serían poco frecuentes y, por tanto, difíciles de estudiar. Estábamos, en buena hora, equivocados.

Empezamos por analizar, de forma muy sencilla, la comprensión que tenían los niños de las representaciones gráficas. Pusimos delante de bebés de nueve meses un libro con fotografías en color de objetos individuales. Para nuestra sorpresa, la mayoría extendían la mano para tocar, rozar, acariciar o rascar las imágenes. Algunas veces incluso trataban de agarrar los objetos fotografiados como si pretendieran sacarlos de la hoja de papel.

Más tarde se comprobaría que se trata de una respuesta universal. La antropóloga Alma Gottlieb, de la Universidad de Illinois, tomó algunos de nuestros libros y una cámara de vídeo y se fue a una lejana aldea beng en Costa de Marfil. Las circunstancias de la prueba eran allí diferentes: los bebés beng se sentaban en el suelo o en el regazo de su madre, mientras aves y cabras vagaban por los alrededores, y otros niños y aldeanos jugaban, trabajaban, hablaban y reían. Los bebés beng, que, casi con toda seguridad, no habían visto antes ninguna fotografía, exploraron con las manos los objetos retratados exactamente igual que lo habían hecho los bebés estadounidenses.

Esta confusión parece ser conceptual, no perceptual. Los niños perciben perfectamente bien la diferencia entre objetos y fotografías o dibujos: si se les da a escoger entre ambos, eligen el objeto real. Pero no acaban de entender qué es un dibujo y en qué difiere del objeto dibujado (el "referente"). Por eso exploran. Ante la fotografía de una botella, por ejemplo, algunos se inclinan y acercan sus labios a la boca del envase. Sin embargo, actúan así sólo cuando el dibujo guarda una gran semejanza con el objeto que representa, como sucede con las fotografías en color. La misma confusión se presenta con las imágenes de vídeo. Pierroutsakos y su compañero Georgene L. Troseth, de la Universidad Vanderbilt, observaron que lactantes de nueve meses, sentados cerca del monitor de televisión, alargaban la mano e intentaban atrapar los objetos que se movían por la pantalla. En cambio, si el objeto dibujado se parece poco al real, un esbozo, raras veces lo exploran.

Hacia los 18 meses, los niños ya comprenden que un dibujo constituye sólo una representación de una cosa real. En vez de manosear la hoja de papel, señalan el dibujo y nombran el objeto o preguntan por su nombre. Melissa A. Preissler, de la Universidad de Yale, y Susan Carey, de la Universidad de Harvard, ofrecieron un buen ejemplo de ello. Emplearon un dibujo simplificado (al trazo) de una batidora para enseñar a unos críos de entre 18 y 24 meses el nombre de este objeto, que no habían visto antes. En su mayoría, los niños asumían que la palabra se refería al objeto en sí y no a su dibujo. Es decir, interpretaban la imagen simbólicamente: entendían que la imagen *representaba*, pero no *era*, el objeto referente.

Uno de los factores que creemos que contribuyen al abandono de la exploración manual de dibujos y fotografías es el desarrollo de un control inhibitorio. En el transcurso de los primeros años de vida, los niños van adquiriendo la capacidad de refrenar los impulsos. Este desarrollo se sustenta en cambios en el córtex frontal. Se supone que un mayor control inhibitorio ayuda a los niños a contener su tendencia impulsiva a relacionarse directamente con dibujos; así aprenden a sólo contemplar, igual que los adultos.

La experiencia con dibujos y fotografías debe también influir en este desarrollo. Vivimos en una sociedad rica en imágenes. La mayoría de los niños se encuentran a diario con fotografías familiares y libros plagados de ilustraciones. A través de estas interacciones aprenden a distinguir entre las reproducciones y los objetos reales; aprenden, además, que los dibujos son motivo de contemplación y conversación, pero no de acción.

No obstante, se requieren varios años de aprendizaje para entender plenamente la naturaleza de las imágenes. El equipo que dirige John H. Flavell, de la Universidad de Stanford, ha descubierto que hasta los cuatro años muchos niños creen que, poniendo boca abajo una foto de un cucurucho de palomitas de maíz, las palomitas de la foto se saldrían del cucurucho.

Pero las imágenes no constituyen la única fuente de confusión simbólica para los bebés. En repetidas ocasiones hemos visto a niños que intentan sentarse en la diminuta silla de la maqueta de nuestro laboratorio. Uttal y Rosengren observaron también, en casa, que sus hijas pretendían acostarse en una camita de muñecas o entrar en un coche de juguete. Al no encontrar información al respecto en la bibliografía especializada,

Resumen/Los símbolos no son intuitivos

- Aunque el pensamiento simbólico constituye una característica del ser humano, no está al alcance de los más pequeños. Los niños tardan varios años en aprender a interpretar los símbolos.
- Durante este proceso, cometen múltiples errores. Confunden, por ejemplo, la fotografía de un objeto con éste o manejan un juguete en miniatura como si fuera el de tamaño real.
- Comprender el significado de un símbolo requiere la elaboración de una representación dual. Sólo cuando los niños ven un objeto en sí mismo y como representación de otra cosa, pueden empezar a pensar de forma simbólica.



2. LOS ERRORES DE ESCALA son corrientes entre los niños de 18 a 30 meses: suelen interactuar con objetos en miniatura como si se tratara de objetos de tamaño natural. Tales errores constituyen un ejemplo más de representación dual fallida. En este caso, el niño no logró sentarse en la silla; acabó cayéndose. (En los experimentos se utilizan objetos de tamaño incluso menor.)

RANDY HARRIS

decidimos estudiar este sorprendente comportamiento.

Errores de Gulliver

Pusimos a críos de entre 18 y 30 meses en una habitación que contenía, entre otras cosas, tres juguetes de gran tamaño: un tobogán, una silla para niños y un coche, al que podían subir y desplazarlo por la habitación con sus pies. Cuando un pequeño había jugado al menos dos veces con cada juguete, se le sacaba de la sala. Entonces, sustituíamos los juguetes por una réplica idéntica en tamaño reducido. Cuando el crío volvía a la habitación no se le comentaba nada acerca del cambio y se le dejaba jugar a su aire. Si el pequeño no hacía caso de los juguetes en miniatura en el espacio de tres o cuatro minutos, le hacíamos fijar su atención en ellos.

Luego, examinamos las filmaciones de la conducta de los niños. Nos interesaba detectar errores de escala, es decir, tentativas de ejecutar acciones claramente imposibles debido a notables diferencias de tamaño entre el niño y el objeto. (La consideración de si un comportamiento corresponde a un error de escala o no debe hacerse con suma cautela.)

Casi la mitad de los niños incurrieron en uno o más de esos fallos. Resultaba evidente que intentaban realizar con los juguetes en miniatura las mismas acciones que habían realizado con los de tamaño natural. Algunos se sentaban en la sillita minúscula: se encaminaban hacia ella, la rodeaban, doblaban las rodillas y se agachaban. Unos simplemente se ponían encima; otros se dejaban caer con tanta fuerza que la sillita salía disparada por la presión. Algunos niños se sentaban en el minitobogán e intentaban deslizarse por él, cayéndose a veces en el intento; otros pretendían subir los peldaños, con el vuelco consiguiente del tobogán. (Los críos no corrían peligro alguno de hacerse daño, porque la silla y el tobogán eran de un plástico resistente y medían sólo unos doce centímetros de altura.) Unos pocos intentaron introducirse en el coche en miniatura. Tal como habían hecho con el juguete grande, abrían la puerta e intentaban —a menudo con notable persistencia— introducir un pie. Una niña llegó incluso a quitarse el zapato, con la vana esperanza de que entonces su pie entraría.

En su mayoría, los críos mostraban poca o ninguna reacción ante los intentos fallidos de jugar con las miniaturas. Un par parecían bastante enfadados y otros avergonzados, pero la mayoría optaban por seguir haciendo cualquier otra cosa. Esta falta de reacción quizá refleje una experiencia diaria de los pequeños cuajada de intentos fallidos.

En nuestra opinión, los errores de escala provienen de una disociación en el uso de la información visual: no se utiliza la misma información para planificar una acción que para ejecutarla. Cuando un niño ve un objeto familiar miniaturizado, la información visual (forma, color, textura del objeto, etcétera) activa su representación mental del referente. A esta memoria se halla asociado el programa motor de interacción con el objeto de tamaño real y otros semejantes. En la mitad de los niños tratados se observó una inhibición de este programa: no intentaban interaccionar con las maquetas de la misma manera que lo hacían con los originales.

En la otra mitad, en cambio, la rutina motora no estaba inhibida: una vez que empezaban la acción, utilizaban la información visual que tenían sobre el tamaño real del objeto para realizar los movimientos con precisión. Por ejemplo, alguno niños se inclinaban sobre la silla minúscula y miraban entre sus piernas para ubicarla con precisión; los que intentaban introducirse en el cochecito, primero abrían la puerta y luego trataban de meter su pie. Los críos basaban la decisión de interaccionar con la maqueta en la información visual que tenían del objeto de tamaño natural; cuando ejecutaban su plan, en cambio, utilizaban la información visual acerca del tamaño real del miniobjeto para guiar sus acciones. Esta diso-

3. LOS NIÑOS DE DOS AÑOS no comprenden la relación simbólica entre la maqueta de una sala y la sala misma. Este niño ve el juguete escondido detrás de la planta en la maqueta, pero no se le ocurre mirar detrás de la planta en la sala real.

ciación en el uso de la información visual es coherente con las teorías dominantes del procesamiento visual: las que postulan que unas zonas del cerebro se ocupan del reconocimiento de objetos y de la planificación, y otras zonas, de la ejecución y del control de las acciones.

Los errores de escala implican un fallo de la representación dual: los niños no distinguen entre un símbolo y su referente. Basamos esta hipótesis en un estudio realizado en 1997 con Rosengren y Kevin F. Miller, de la Universidad de Illinois, en el que demostramos que la confusión entre referente y objeto simbólico desaparece cuando se elimina la exigencia de una representación dual. Para el experimento convencimos (con el pleno consentimiento de sus padres, por supuesto) a niños de dos años y medio de que teníamos un aparato que podía hacer pequeños los objetos cotidianos.

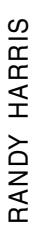
La máquina mágica

Mediante nuestro artilugio miniaturizador, nos proponíamos comprobar si era la necesidad de pensar de dos formas a la vez en un objeto lo que dificultaba la comprensión de los símbolos. Si un niño cree que una máquina ha empequeñecido un objeto o una sala, entonces piensa que la miniatura es la cosa misma. Al no existir una relación simbólica entre la sala y la correspondiente maqueta, debería poder aplicar lo que sabe del objeto grande al pequeño.

Utilizamos los poderes de nuestro artefacto para convertir los juguetes en copias diminutas de ellos mismos; empequeñecimos también una gran tienda de campaña. Delante del niño, pusimos un juguete —un duende de chillona melena pelirroja— dentro de la tienda de campaña; enfocamos la máquina reductora hacia la tienda. Después, el niño y el experimentador se trasladaban a otra habitación para esperar a que la máquina hiciera su trabajo. Cuando volvían al laboratorio, encontraban una tienda pequeñita en el lugar donde antes había la grande. (Resultó sorprendente que a los niños no les llamara la atención lo más mínimo que una máquina pudiera miniaturizar objetos o que exigiera intimidad para hacerlo.)

Cuando pedíamos a los niños que buscaran el juguete, se dirigían directamente a la tienda en miniatura. Al creer que ésta correspondía a la tienda original tras sufrir los efectos de la máquina jibarizadora, encontraban sin problemas el juguete escondido. A diferencia de lo que sucedía en el experimento con la maqueta, no necesitaban manejar ninguna representación dual: la tienda pequeña era la misma que la grande, y por eso, el juguete estaba donde debía estar, según su visión del mundo.

Comprender la función que la representación dual desarrolla en la utilización de los símbolos por parte de los niños entraña aplicaciones prácticas de suma importancia. Una tiene que ver con el empleo de muñecos en las entrevistas a niños que podrían haber sufrido abusos sexuales. Las víctimas suelen ser niños de corta edad, a quienes resulta difícil entrevistar. Por ese motivo, profesionales de toda índole (policías, asistentes sociales y psicoterapeutas) recurren



a muñecos de realista precisión anatómica, suponiendo que para el niño resulta más fácil describir lo sucedido con la ayuda de un muñeco. Pero esta suposición implica la ulterior hipótesis de que el niño estará ya capacitado para pensar en este objeto como un muñeco y como una representación de sí mismo.

Maggie Bruck, de la Universidad Johns Hopkins, Stephen J. Ceci, de la Universidad Cornell, Peter A. Ornstein, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, y sus colaboradores han cuestionado esta hipótesis. En numerosos estudios independientes, estos expertos pidieron a párvulos (de hasta cinco años) que explicaran lo que recordaban de una revisión médica con su pediatra, que había incluido o no un examen genital. Unas veces se empleaban muñecos anatómicos para interrogar a los niños; otras, no. En general, los relatos de los niños eran más fieles a lo ocurrido cuando no se les facilitaba el muñeco; cuando utilizaban el muñeco se mostraban más propensos a dar información falsa acerca de los tocamientos genitales.

Fundada en mi investigación, que documenta la dificultad de los niños para interpretar los objetos simbólicos, sospeché que los más pequeños no se hallaban quizá capacitados para relacionar su propio cuerpo con el del muñeco. Realizamos una serie de estudios mediante una sencilla tarea de ubicación. Catherine Smith enganchaba una pegatina en alguna parte del cuerpo del niño; por ejemplo, en un hombro o en un pie. Luego, solicitaba al niño que colocara una pegatina, igual pero de menor tamaño, en el mismo lugar de un muñeco. En general, los niños de entre tres y tres años y medio de edad pusieron la pegatina en el lugar correcto; los menores de tres años, en cambio, no acertaron en más de la mitad de los casos. El hecho de que los pequeños no relacionaran su propio cuerpo con el del muñeco en esta situación tan sencilla —que no requería memoria ni implicación emocional— respalda las críticas contra el uso de muñecos en entrevistas con repercusiones legales. (A consecuencia de éste y otros trabajos de este tipo, la utilización de muñecos con niños menores de cinco años se considera ahora menos adecuada que en épocas pasadas; en al menos un estado de los EE.UU. se ha prohibido.)

La simbolización en el aprendizaje

El concepto de representación dual tiene implicaciones también en el ámbito de la didáctica. En todas las aulas de parvulario y primaria se utilizan materiales manipulativos (bloques, barras, regletas y otros objetos concebidos para representar cantidades numéricas). Se supone que estos objetos, concretos, ayudan a los niños a comprender los conceptos matemáticos, abstractos. Pero si los niños no entienden la relación entre el objeto y lo que representa, el uso de materiales manipulativos podría resultar contraproducente. De hecho, algunos estudios sugieren que los niños a menudo tienen dificultades para comprender y usar dichos materiales.

Meredith Amaya, de la Universidad del Noroeste, Uttal y la autora estamos estudiando el efecto de la experiencia con objetos simbólicos en críos que aprenden las letras y los números. Valiéndonos de regletas diseñadas para el aprendizaje de la aritmética, enseñamos a alumnos de seis y siete años a hacer ejercicios de resta que requerían llevar (un tipo de ejercicios de notable dificultad para los pequeños). Al grupo de control les enseñamos lo mismo, pero sólo con papel y lápiz. Ambos grupos aprendieron a resolver los ejercicios igual de bien, pero el que utilizaba las regletas tardó el triple en resolverlos. Después del estudio, una niña, que había utilizado las regletas, nos dio un consejo: "¿Alguna vez habéis pensado en enseñar a hacer estos ejercicios con papel y lápiz? Es mucho más fácil".

Los libros infantiles requieren también su dosis de representación dual. Los populares libros "interactivos", por ejemplo, contienen varios elementos diseñados para estimular la interacción: solapas que cuando se levantan destapan dibujos, palancas que, al estirarse, ponen imágenes en movimiento, etcétera.

Cynthia Chiong, doctoranda de mi grupo de investigación, y yo sostenemos que estos elementos podrían distraer a los niños de la información que ofrece el libro. Por ello hemos empezado a utilizar otros tipos de libros para enseñar las letras a niños de 30 meses. Uno es un sencillo alfabeto ilustrado, de aspecto anticuado, en el que cada letra está nítidamente impresa en negro y acompañada de un dibujo ("A de árbol", "B de balón"…). El otro incluye varios elementos interactivos. Los niños que aprenden con el libro sencillo reconocen después más letras que los que se sirven del complicado. Es de suponer que los pequeños focalizan con mayor facilidad su atención en el libro sencillo en dos dimensiones que en el interactivo, donde su atención se desvía hacia los elementos tridimensionales. Cuando se trata de libros educativos para niños, menos puede significar más.

De estos estudios se infiere que bebés y niños se desorientan con aspectos de los símbolos que a los adultos nos parecen obvios. Deben superar obstáculos en su camino hacia la concepción madura de lo que representan los símbolos, cada vez más abundantes en su entorno. Una comprensión más profunda de las diversas etapas del desarrollo del pensamiento simbólico quizá contribuya a identificar y abordar problemas de aprendizaje derivados de la dificultad de captar el significado de los símbolos.

La autora

Judy S. DeLoache ocupa la cátedra William R. Kenan, Jr., de psicología en la Universidad de Virginia. Se dedica al estudio de las primeras etapas en el desarrollo cognitivo. La autora muestra su agradecimiento a todos los niños y familias que han participado en la investigación.

Bibliografía complementaria

JEOPARDY IN THE COURTROOM: THE SCIENTIFIC ANALYSIS OF CHILDREN'S TESTIMONY. S. J. Ceci, M. Bruck. American Psychological Association; Washington, D.C., 1995.

BECOMING SYMBOL-MINDED. J. S. DeLoache en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, n.º 2, págs. 66-70; febrero 2004.

SCALE ERRORS OFFER EVIDENCE FOR A PERCEPTION-ACTION DISSOCIATION EARLY IN LIFE. J. S. DeLoache, D. H. Uttal, K. S. Rosengren en *Science*, vol. 304, págs. 1027-1029; mayo 2004.

Cuando el aneurisma se complica

A partir de estudios sobre el crecimiento y la estabilidad de los aneurismas aórticos se establecen criterios clínicos que determinan cuál es el momento más apropiado para operar este trastorno vascular

John A. Elefteriades

Me disponía a disfrutar del primer sábado radiante de primavera cuando recibí la llamada de Lawrence Cohen, cardiólogo y compañero de la Universidad de Yale. Parecía aterrado. "Necesito tu ayuda, John. En el servicio de Urgencias. Ven enseguida. Se está muriendo, John. La estoy viendo morir."

Se trataba de Carmela Colman. Cohen había seguido la evolución de su enfermedad durante tres años, desde que su marido había llegado a Yale para dar clases. Carmela era ya un miembro de la familia. De 32 años de edad, padecía síndrome de Marfan, un trastorno del tejido conjuntivo que tiende a producir aneurismas en la aorta torácica: unas peligrosas dilataciones en la parte superior de la gran arteria que conduce la sangre desde el corazón, a través del tórax, hasta el abdomen. Si no se tratan, los aneurismas crecen hasta romperse, una complicación que, a menudo, resulta fatal. Puede recurrirse a una operación quirúrgica preventiva que consiste en sustituir la parte alterada de la aorta por segmento vascular artificial. Pero la cirugía entraña sus propios riesgos, por lo que los médicos la recomiendan sólo cuando parece absolutamente necesaria. Debido a que la aorta de Carmela sólo estaba moderadamente dilatada, Cohen había decidido no operar.

Aquella mañana de sábado, Carmela se había presentado en el servicio de urgencias quejándose de un intenso dolor en el pecho. Un escáner mediante TAC (tomografía axial computarizada) y un ecocardiograma mostraron que había sufrido una disección aórtica: la sangre había pasado a través de una brecha en la capa interna de la pared arterial, provocando que ésta se separara de la externa a lo largo de toda la aorta. Una disección puede resultar, por sí sola, letal, ya que el flujo sanguíneo se bloquea o cambia de dirección, de forma que el corazón y otros órganos dejan de recibir oxígeno y nutrientes. Pero aquello no era lo peor. Las imágenes del escáner indicaban que Carmela tenía sangre en el pericardio, el saco que rodea el corazón. Esto quería decir que la disección aórtica había acabado en ruptura. Como consecuencia, perdía la conciencia y su presión arterial había caído hasta llegar al estado de shock. Necesitaba con urgencia una intervención quirúrgica.

Corrí al hospital. Allí, con mi equipo quirúrgico sustituí el debilitado segmento de la aorta de Carmela por una aorta artificial fabricada con dacron, un tejido que ofrece flexibilidad y resistencia a la vez. Sustituimos también su lesionada válvula aórtica, que controla el flujo de sangre que sale del corazón, por una versión mecánica. Tras la operación, Carmela se encontraba en un estado de suma gravedad. Pero se aferró a la vida y, poco a poco, se recuperó.

Cada noche, cuando iba a pasar visita al hospital, hablaba con el marido de Carmela, John Rizzo, sobre el estado de su esposa. Cuando ella ya se encontraba mejor, nuestras conversaciones vespertinas deriva-

TAMI TOLPA



1. LOS ANEURISMAS, dilataciones segmentarias de la aorta, suponen una amenaza silenciosa, aunque potencialmente letal.

ron a otros temas más científicos, en especial los relacionados con la enfermedad aórtica.

Rizzo, experto en el análisis y tratamiento de datos, trabajaba en el departamento de epidemiología de la facultad de salud pública. Dedicó un amable interés a nuestro grupo de trabajo. En el decenio que siguió a aquella estancia de Carmela en el hospital, Rizzo nos ha ayudado a elaborar una base de datos que contiene las historias clínicas de todos nuestros pacientes con aneurismas de la aorta torácica. Ahora poseemos información digitalizada de más de 3000 pacientes con este diagnóstico, entre la que se incluyen unas 9000 imágenes y 9000 pacientes-año de observación. No tenemos noticia de ninguna otra base de datos sobre esta enfermedad.

Esta extensa fuente de información clínica nos ha permitido ahondar en la evolución de los aneurismas de la aorta torácica: a qué ritmo crecen, cuándo puede decirse que han alcanzado un tamaño crítico y quién se halla más expuesto a padecerlos. Este conocimiento constituye una herramienta poderosa para decidir en qué momento conviene realizar una intervención quirúrgica y evitar así episodios como el que vivió Carmela aquel sábado de primavera.

Acoso silencioso

Los aneurismas se desarrollan en cualquier arteria. Sobre todo en la aorta abdominal: el tramo de la aorta que se extiende desde el diafragma hasta un área situada por encima de la pelvis, donde la arteria se divide en ramas para distribuir la sangre a las extremidades. Los mecanismos que subyacen en el desarrollo, disección y ruptura de los aneurismas abdominales aórticos guardan semejanza con los que controlan el comportamiento de los aneurismas torácicos.

Los aneurismas que afectan a la aorta son los de mayor riesgo vital. Cada año mueren en los EE.UU. más de 15.000 personas a causa de la ruptura o disección de un aneurisma torácico o abdominal, un número superior al de víctimas del sida. Albert Einstein, Flo Hyman (estrella olímpica del voleibol), y los actores Lucille Ball, George C. Scott y John Ritter murieron de aneurismas de la aorta torácica. Las personas con síndrome de Marfan son especialmente propensas a desarrollar este trastorno vascular. Los historiadores de la medicina creen que Abraham Lincoln podría haber sufrido aneurismas. Antes de que fuera posible tratarla quirúrgicamente, quienes padecían esta enfermedad morían en el ecuador de la vida. Quizás el decimosexto presidente estadounidense habría fallecido precozmente, incluso aunque no lo hubieran asesinado.

Los aneurismas aórticos resultan insidiosos. Acosan de forma silenciosa. La aorta se dilata sin causar dolor. De hecho, en la mayoría de los pacientes el aneurisma se diagnostica en un examen clínico planteado por otras causas. La asintomática dilatación aórtica puede detectarse en un ecocardiograma realizado para investigar la causa de un soplo cardíaco o en un TAC practicado para evaluar una tos crónica. El dolor llega cuando el aneurisma se rompe o sufre una disección. Es muy intenso: la sensación de desgarro que acompaña a la crisis se equipara al que provocaría una puñalada; se describe como más insoportable que el dolor que provoca un parto o un cólico renal.

La supervivencia de quienes sufren estas complicaciones es escasa. La ruptura, en general, mata al instante. Sin embargo, en algunos casos afortunados los tejidos vecinos ejercen presión sobre la brecha producida en la pared aórtica y mantienen la estructura el tiempo suficiente para trasladar el paciente al hospital. En las disecciones de la pared aórtica la supervivencia depende de su localización. Si no se tratan quirúrgicamente, las que comienzan en la aorta ascendente —el segmento que emerge del corazón— resultan fatales en horas o días; dislocan la válvula aórtica, provocando un estado de shock, o bien ocluyen las arterias coronarias, dando origen a un infarto de miocardio. Las disecciones en la aorta descendente —que se baja hacia la parte posterior de la caja torácica— no resultan tan amenazantes; se rompen con menos frecuencia que las de

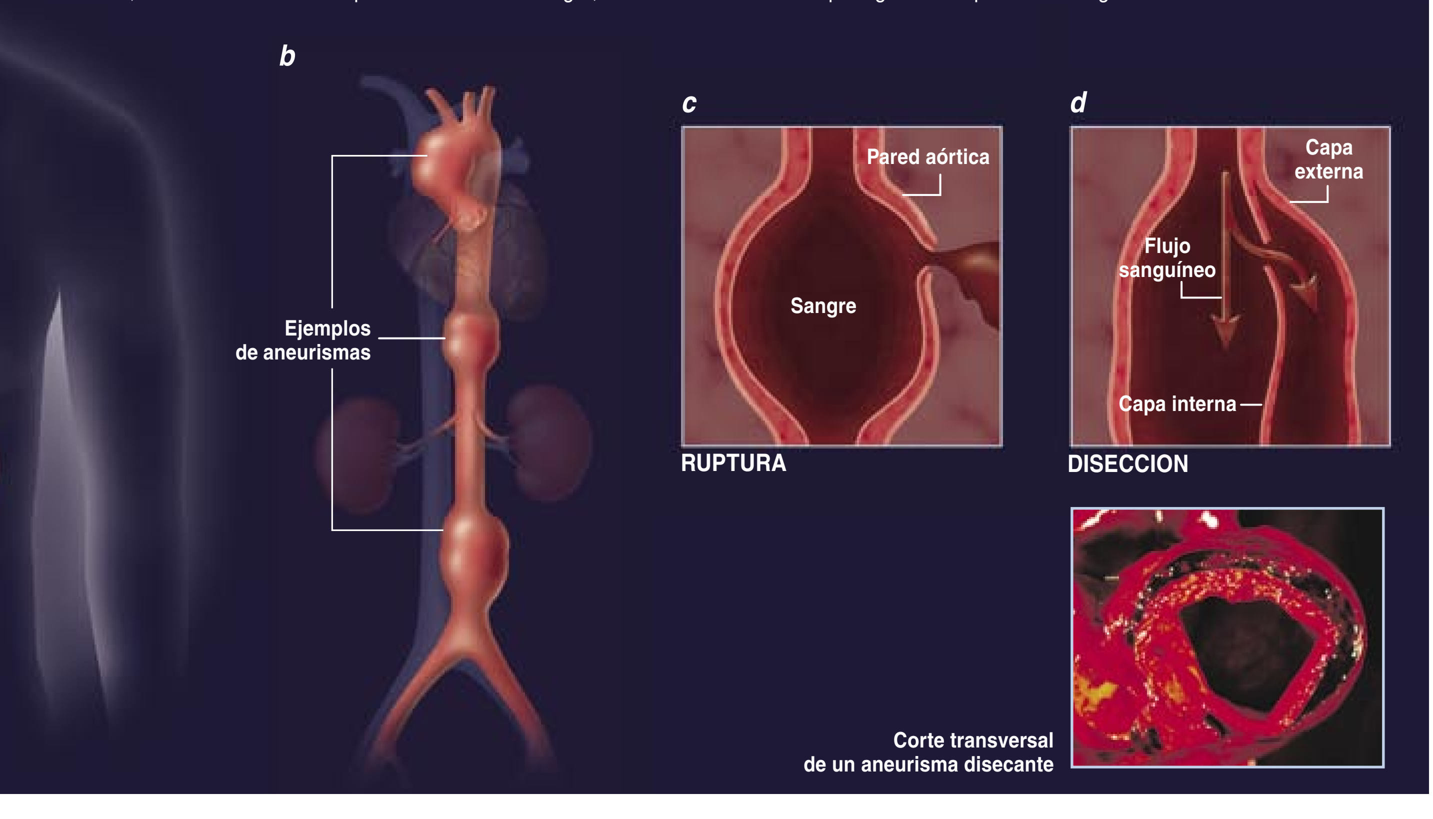
La aorta normal (*a*) guarda semejanza con el palo de un caramelo; su grosor es parecido al de una manguera de riego. Un aneurisma, que puede producirse en cualquier lugar a lo largo de este tubo, consiste en una dilatación de la

Resumen/Aneurismas

- ¿Cuál es el momento más apropiado para operar un aneurisma aórtico? Si se deja crecer sin más, esta dilatación de la mayor arteria que conduce la sangre desde el corazón puede fatalmente sufrir una rotura o una disección (separación de las capas interna y externa de la pared del vaso). Pero la sustitución del segmento alterado de la aorta por un segmento artificial —el único tratamiento quirúrgico disponible— entraña un riesgo elevado.
- Un análisis detallado del historial de miles de pacientes ha conducido a establecer guías clínicas que facilitan la toma de decisiones sobre la idoneidad de dicha intervención quirúrgica.
- Los levantadores de pesos con aneurisma torácico corren el riesgo de sufrir una muerte súbita durante el ejercicio halterofílico. Deben tomar especial precaución.

COMPLICACIONES DE LOS ANEURISMAS

pared (*b*), que se adelgaza y debilita cuando la aorta aumenta de volumen. Esta alteración puede resultar letal si el tejido de la pared sufre una ruptura (c), una disección (*d* y *fotografía*) o ambas. La disección, la separación de las capas interna y externa de la pared del vaso, es el resultado de la penetración de la sangre, a través de un desgarro de la capa interna, en la capa media de la pared aórtica. Tras el análisis de miles de casos, podemos ya estimar la probabilidad de ruptura o disección de un aneurisma. Así resulta más fácil determinar en qué momento la necesidad de una intervención quirúrgica sobrepasa los riesgos inherentes a la misma.



Corte transversal de un aneurisma disecante

SARA CHEN (*ilustración*); CNRI/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*fotografía*)

la aorta ascendente y no comparten las mismas complicaciones.

El tratamiento quirúrgico previene la ruptura o la disección, pero la operación que sustituye el tramo afectado de la aorta es muy invasiva y entraña notables riesgos. Requiere parar el corazón y derivar la sangre a una máquina corazón-pulmón. En algunos casos, dependiendo de la localización del aneurisma, debe interrumpirse el flujo sanguíneo por completo y enfriar el paciente de 37 a 18 grados Celsius para lentificar el metabolismo y prevenir la lesión cerebral, mientras se repara la aorta. Aunque la mayoría de los pacientes se recuperan, la intervención comporta riesgos de accidente vascular cerebral, parálisis y muerte.

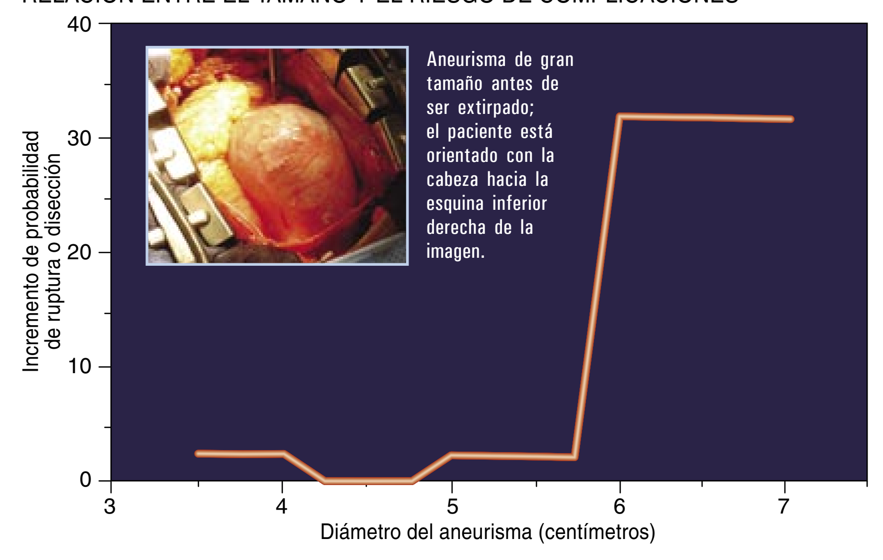
Para evaluar si merece la pena correr el riesgo inherente a una intervención tan peligrosa, debe conocerse la probabilidad de que un aneurisma aórtico sufra ruptura o disección. En general, el riesgo aumenta con el tamaño del aneurisma. Para nuestro infortunio, cuando Carmela sufrió la ruptura no disponíamos de datos específicos. Aunque se habían publicado más de 300 artículos sobre operaciones de la aorta, encontramos poca información acerca de cómo los aneurismas aórticos evolucionan antes de una intervención quirúrgica, es decir, a qué velocidad se expanden y cuál es la probabilidad de ruptura o disección para un tamaño determinado. La aorta de Carmela, por ejemplo, había sufrido una disección cuando el aneurisma había alcanzado los 4,8 centímetros de diámetro, un tamaño relativamente modesto (el diámetro de una aorta torácica sana oscila entre 2,5 y 3,5 centímetros) —por esta razón su empeoramiento nos encontró desprevenidos—. Vista la necesidad de ahondar en las cuestiones relacionadas con el crecimiento y la estabilidad de un aneurisma, decidimos acometer nuestra propia investigación.

Tamaño crítico

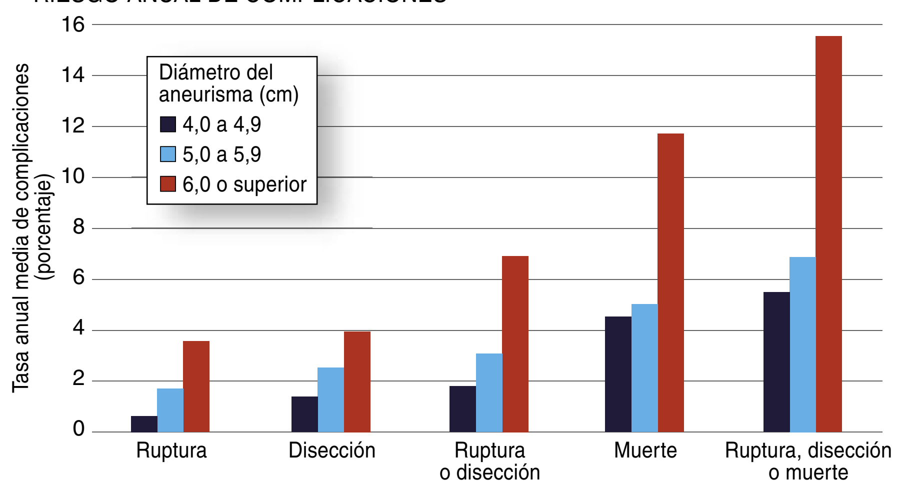
Rizzo desarrolló técnicas estadísticas que nos permitirían extraer esa información de nuestra base de datos clínicos. Así determinamos con precisión el ritmo de crecimiento de los aneurismas. Encontramos que la mayoría crece de forma inexorable y sorprendentemente lenta: sólo unos 0,12 centímetros anuales. Por tanto, un aneurisma tardaría alrededor de un decenio en crecer un centímetro. Este hallazgo sugiere que los aneurismas detectados en adultos de mediana edad comienzan a crecer cuando éstos salen de la adolescencia o incluso antes.

Evaluamos también la probabilidad de ruptura o de disección de los aneurismas torácicos de diferentes tamaños. Nos sorprendió el carácter definitorio de los resultados. De acuerdo con nuestros datos, la probabilidad de ruptura o de disección se dispara cuando un aneurisma torácico alcanza un diámetro de unos

RELACION ENTRE EL TAMAÑO Y EL RIESGO DE COMPLICACIONES



RIESGO ANUAL DE COMPLICACIONES



2. LA PROBABILIDAD de ruptura o disección se ha calculado para el aneurisma de la aorta torácica. La gráfica superior muestra el riesgo en relación al de los aneurismas de entre 4,0 y 4,9 centímetros; aumenta de forma brusca cuando el aneurisma alcanza los 6 centímetros en la aorta ascendente (*naranja*) o siete centímetros en la aorta inferior (*no representado*). La gráfica inferior representa la posibilidad de ruptura, disección o muerte en el transcurso de un año; crece de forma súbita también para los aneurismas que miden seis centímetros o más. (Los porcentajes indicados para "ruptura o disección" y para "ruptura, disección o muerte" son inferiores a la suma de los porcentajes en las categorías individuales porque los pacientes con múltiples complicaciones se contabilizaron sólo una vez en la categoría combinada). De estos estudios se infiere que un gran número de pacientes con aneurismas en la aorta ascendente requieren intervención quirúrgica cuando la dilatación alcanza los 5,5 centímetros de diámetro.

seis centímetros (aproximadamente el de una lata de refresco). Más del 30 por ciento de los pacientes cuyos aneurismas alcanzaron ese tamaño sufrieron alguna de las devastadoras complicaciones, fuera ruptura o disección. En la aorta descendente, el riesgo aumenta de forma notable cuando alcanza los siete centímetros de diámetro.

Las cifras presentadas definen el riesgo de complicación en el transcurso de la vida, es decir, la probabilidad de que un aneurisma de un tamaño dado se rompa o sufra una disección; nada dicen acerca de cuándo se producirá la crisis. Sin embargo, a los pacientes con aneurisma les interesan más las predicciones sobre la tasa anual de complicaciones. Lo que quieren saber es si su aneurisma empeorará en un futuro próximo.

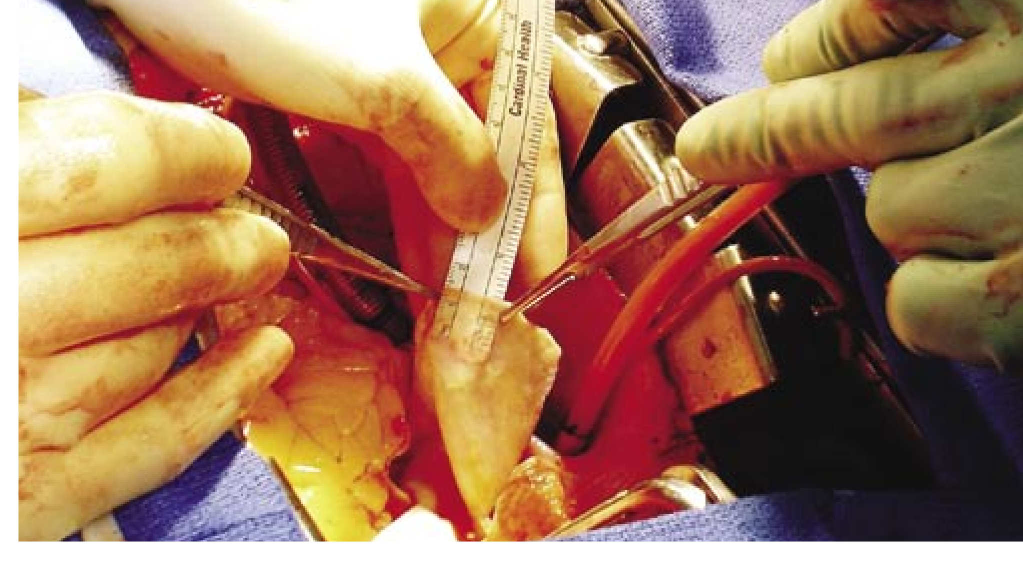
El cálculo de estas probabilidades requiere el análisis de un gran número de casos. En fecha reciente, hemos conseguido acumular suficientes datos para acometer el correspondiente tratamiento estadístico. Combinan información de pacientes con aneurismas localizados en cualquier lugar de la aorta torácica, aunque cerca de dos tercios de los pacientes estaban afectados en la aorta ascendente. Observamos una tendencia al incremento gradual en la probabilidad de aparición de complicaciones en el transcurso del año conforme el aneurisma crece desde 4,0 a 5,9 centímetros, y un incremento brusco del riesgo cuando la aorta alcanza los seis centímetros de diámetro. Por ejemplo, para un aneurisma torácico de seis centímetros o mayor, el riesgo de ruptura, disección o muerte dentro de un año asciende hasta un impresionante 15,6 por ciento. Un gran número de tipos de cáncer no arrastran una tasa de mortalidad anual tan elevada.

De estas observaciones se derivan varias recomendaciones. Los aneurismas localizados en la aorta ascendente conviene extirparlos, antes de que alcancen los seis centímetros de diámetro. Para la mayoría de las personas sin historia familiar de aneurismas se sugiere la intervención quirúrgica cuando el aneurisma tiene 5,5 centímetros. Para la aorta descendente, la operación se realizaría a los seis centímetros si el estado de salud del paciente lo permite; si se encuentra demasiado frágil, se retrasaría hasta los seis centímetros y medio. En los pacientes con el síndrome de Marfan o con una historia familiar de trastornos relacionados con aneurismas, la extirpación del aneurisma debe realizarse con tamaños inferiores a los citados, ya que en estos casos el riesgo de ruptura o disección tiende a presentarse antes. En nuestra opinión, la aplicación de estos criterios prevendría la mayoría de las rupturas y disecciones, y evitaría la exposición indebida o prematura de los pacientes a los riesgos de la cirugía aórtica. Antes de operar un aneurisma, los médicos deben intentar proteger a la aorta mediante fármacos que controlen la presión sanguínea y disminuyan el ritmo

ALISON KENDALL (*gráficas*); JOHN A. ELEFTERIADES (*fotografías*); FUENTE DE LA GRAFICA SUPERIOR: M. A. COADY ET AL. EN *JOURNAL OF THORACIC CARDIOVASCULAR SURGERY*, VOL. 113, N.º 3, PAGS. 476-491, MARZO DE 1997; FUENTE DE LA GRAFICA INFERIOR: R. R. DAVIES ET AL. EN *ANNALS OF THORACIC SURGERY*, VOL. 73, N.º 1, PAGS. 17-27; ENERO DE 2002.

cardíaco, para limitar el estrés que sufre la pared aórtica dilatada.

En general, la ruptura de la aorta abdominal ocurre en aneurismas de menor tamaño que los torácicos (la aorta abdominal suele ser más estrecha que la torácica). Por ello, el tamaño de aneurisma a partir del cual se considera recomendable una intervención quirúrgica es menor en el caso abdominal: cuatro centímetros en las mujeres y cinco centímetros en los hombres.



3. LA PARED DE LA AORTA ha adquirido tal ligereza (debido a un aneurisma), que las marcas de una regla pueden verse a su través. Nuevos hallazgos indican que los aneurismas se producen en parte por la hiperactividad de las metaloproteinasas; estas enzimas digieren proteínas que confieren elasticidad a la pared arterial.

JOHN A. ELEFTERIADES

Historia familiar

Conocer el riesgo de sufrir aneurismas de un individuo asintomático constituiría una de las mejores herramientas preventivas. Facilitaría la detección precoz de la enfermedad y, por tanto, una vigilancia más atenta y una pronta aplicación de tratamiento. El síndrome de Marfan debe interpretarse como un aviso, pues un gran número de los que lo padecen terminan desarrollando aneurismas aórticos. Sin embargo, en los individuos con síndrome de Marfan se concentra sólo el 5 por ciento de los afectados por aneurismas. El 95 por ciento restante corresponde a casos idiopáticos (de causa desconocida).

Solía creerse que la causa de todos los aneurismas se hallaba en la ateroesclerosis, una acumulación de placas lipídicas en la pared arterial. Sin embargo, de nuestro estudio se desprende que los pacientes con aneurismas en la aorta torácica ascendente son menos propensos a la ateroesclerosis que la población general; la deposición de placas no parece ser la causa de aneurisma en estos casos. En cambio, los aneurismas de la aorta torácica descendente y de la aorta abdominal sí se asocian a menudo con la presencia de placas de ateroesclerosis en la aorta y en sus ramas. La ateroesclerosis podría contribuir al desarrollo de aneurismas en estas regiones.

El análisis de nuestra base de datos ha puesto de manifiesto que la mayoría de los aneurismas de la aorta torácica, así como los de la aorta abdominal y del cerebro, poseen un poderoso componente genético. En la historia familiar de un gran número de los pacientes estudiados aparece algún pariente que murió de forma súbita o inesperada a edad muy precoz. Estas muertes suelen atribuirse a una parada cardíaca, pero quizás una autopsia habría revelado que se trataba de la ruptura de un aneurisma. Alrededor del 20 por ciento de las 500 familias estudiadas muestra algún caso de aneurisma. En la mayoría de los casos, la herencia parece ser dominante: basta sólo un "gen de aneurisma" de uno de los progenitores para que el descendiente resulte afectado. En una de las familias, el padre transmitió la enfermedad aórtica a sus cuatro hijos. Otras muestran diferentes patrones de herencia, lo que sugiere que el riesgo de padecer la enfermedad viene determinado por más de un gen.

Si los marcadores genéticos que aumentan la susceptibilidad se conocieran, un simple análisis de sangre bastaría para identificar los sujetos que necesitan un seguimiento atento —mediante TAC o ecocardiografía— con el fin de detectar cuanto antes la presencia de aneurismas y determinar el momento más apropiado para una intervención quirúrgica. Si se descubrieran los genes responsables de la enfermedad, podrían desarrollarse tratamientos específicos para contrarrestar los efectos nocivos, demorando o previniendo el crecimiento de los aneurismas mediante el bloqueo de las proteínas codificadas por dichos genes.

Con el objetivo de mejorar la detección y, en último término, el tratamiento del aneurisma, hemos iniciado un proyecto de investigación en colaboración con la empresa Celera Diagnostics sobre los marcadores genéticos SNP (siglas, en inglés, de "polimorfismos de un solo nucleótido") que se correlacionan con la enfermedad aórtica. Los SNP son secuencias de ADN que difieren en un solo nucleótido (o letra del código) entre una y otra parte de la población. James Devlin, Olga Iakoubova y su equipo de Celera han comparado muestras de ADN extraídas de 500 pacientes que presentaban aneurismas torácicos con muestras procedentes de 500 individuos sanos, en este caso las esposas de los pacientes. Mediante un equipo automatizado, rastrearán 16.000 regiones genéticas en busca de SNP que aparezcan en los pacientes con aneurisma aórtico más a menudo que en los individuos sanos del grupo control.

Los resultados preliminares revelan varios SNP cuya presencia podría incrementar el riesgo de forma notable, por lo que estamos siguiendo esta pista en una muestra de pacientes más extensa. Asimismo, estamos llevando a cabo un estudio similar en pacientes con aneurismas en Europa, para comprobar si la validez de estos hallazgos se mantiene en otra población.

¿Por qué falla la aorta?

Una vez identificados los genes con SNP relacionados con aneurismas, podremos discernir cuáles son las proteínas que codifican dichos genes y saber cómo contribuyen al mal funcionamiento de la aorta. Se sospecha ya de algunas proteínas que podrían hallarse implicadas en este trastorno. Sabemos, por ejemplo, que en la ma-

Riesgos de la halterofilia

En el año 2003, publicamos un artículo sobre un trágico caso quíntuple de disección de la aorta torácica. Se trataba de cinco individuos, aparentemente sanos, que practicaban con regularidad ejercicios que requerían un esfuerzo físico extremo. Cada uno de ellos albergaba, sin saberlo, un aneurisma en la aorta que emerge del corazón. De forma súbita y amenazante para sus vidas, la capa interna de la pared arterial se separó de la capa externa. En el momento en que se produjo la disección, dos estaban levantando pesos, otros dos hacían flexiones y el quinto intentaba levantar un pesado bloque de granito. Tres se salvaron mediante una intervención quirúrgica. Desde entonces hemos tenido conocimiento de docenas de casos de disección aórtica producidos durante la realización de ejercicios halterofílicos, lo que sugiere que este fenómeno no corresponde a ninguna rareza médica.

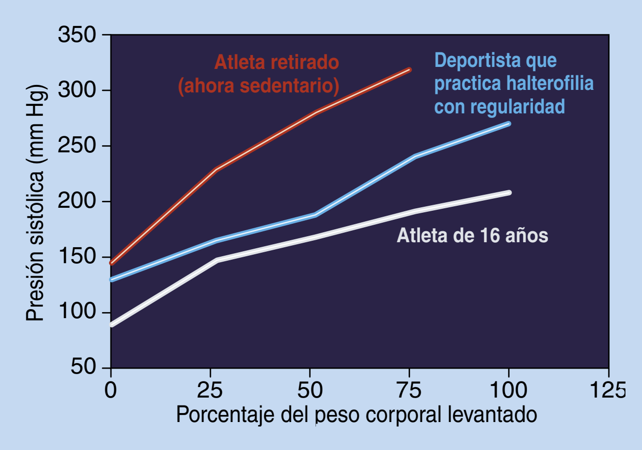
¿Qué relación puede haber entre el levantamiento de pesos y la disección del aneurisma? Quizás el ejercicio físico que implica un gran esfuerzo contra una resistencia fija —como la halterofilia— hace subir la presión sanguínea hasta niveles peligrosos. Estudios con levantadores de peso que compiten relatan valores de presión sistólica, la que existe en las arterias cuando el corazón se contrae, de 380 milímetros de mercurio (mm Hg) (los niveles normales suelen ser de 120 mm Hg o inferiores). También en una modesta investigación realizada con tres voluntarios, detectamos una desmesurada subida de presión: uno de los participantes alcanzó los 319 mm Hg cuando levantaba sólo tres cuartas partes del peso de su cuerpo (*gráfica*).

Esta presión puede resultar excesiva para una arteria ya dilatada. Análisis de las propiedades mecánicas de la aorta distendida revelan que a 200 mm Hg un aneurisma de seis centímetros sufre una presión de 800 kilopascal, cifra que iguala a la máxima resistencia a la distensión del tejido aórtico. Por tanto, no resulta sorprendente que un aneurisma aórtico sometido a una presión sanguínea próxima o superior a los 300 mm Hg ceda.

Aconsejamos a los deportistas con una historia personal o familiar de aneurisma aórtico, o cualquier engrosamiento de la aorta, prudencia en sus prácticas halterofílicas. Recomendamos no levantar nunca un peso igual o superior a la mitad de su peso corporal. Levantar pesos puede resultar muy beneficioso para preservar la masa muscular y la resistencia ósea, pero antes de comenzar un programa de halterofilia debería solicitarse un ecocardiograma para descartar la presencia de aneurismas.



UN HOMBRE JOVEN que sufrió una disección aórtica inducida por el levantamiento de un peso excesivo muestra la cicatriz de la intervención quirúrgica que le salvó la vida. Con toda probabilidad, un brusco aumento de la presión arterial durante la realización del ejercicio precipitó la disección. Incluso en los individuos sanos, la presión sanguínea puede alcanzar, durante el levantamiento, valores astronómicos, superiores a los 300 mm Hg (*gráfica*).



yoría de los pacientes con aneurisma aórtico el segmento dilatado de la pared del vaso evidencia una merma de fibras elásticas y de colágeno, si se compara con tejido sano. Estas proteínas fibrosas confieren resistencia y flexibilidad a la arteria. Los defectos que contribuyen a la debilidad de la pared aórtica pueden ocurrir en los genes que codifican tales proteínas o bien en los que regulan la síntesis o el mantenimiento de la elastina y el colágeno.

En el síndrome de Marfan, los defectos genéticos suelen afectar al gen de la fibrilina, una proteína que, combinada con la elastina, forma las fibras elásticas. La consiguiente alteración de la síntesis y deposición de la fibrilina debilita la pared aórtica y la hace más vulnerable a la formación de aneurismas. No obstante, no se sabe todavía si las mutaciones en el gen de la fibrilina son frecuentes en los pacientes que no padecen el síndrome de Marfan.

Hemos hallamos pruebas de que la abundancia excesiva de determinadas enzimas en la pared aórtica contribuye a la formación y al crecimiento de aneurismas en un gran número de pacientes. Todos los vasos sanguíneos contienen metaloproteinasas (MMP) que destruyen las proteínas viejas para crear espacio donde asentar las nuevas. Estos vasos poseen también proteínas inhibidoras que mantienen a raya las MMP. En una pared aórtica sana, la actividad de estas proteínas se encuentra equilibrada: el recambio proteínico se mantiene, pues, constante. En cambio, en segmentos de aorta extirpados de pacientes con aneurisma se observa un exceso de dos tipos de MMP y una disminución de una de las proteínas inhibidoras.

Un tal desequilibrio potenciaría la degradación de las proteínas, incluidas la elastina y la fibrilina, en la pared aórtica, situación que podría allanar el camino a la formación de aneurismas torácicos, por debilitamiento de la pared del vaso. En cierto paciente, la aorta se había adelgazado tanto, que las marcas de una regla podían leerse a través de su pared. Estudios recientes (basados en la

JAKE MESSERE (*fotografía*); ALISON KENDALL (*gráfica*)

hipótesis de las metaloproteinasas hiperactivas) sugieren que fármacos capaces de bloquear la actividad de las MMP podrían retardar el crecimiento o prevenir la ruptura de los aneurismas aórticos.

Con George Koulias, de la Universidad de Yale, hemos comenzado a estudiar las propiedades mecánicas de la aorta dilatada para comprender mejor por qué aumenta el peligro a medida que ésta se va extendiendo. Antes de extirpar un aneurisma, medimos su diámetro, el grosor de su pared y la presión arterial cuando el corazón se contrae y se relaja. A partir de estos parámetros, determinamos las propiedades mecánicas del vaso.

Hemos demostrado que en paralelo al proceso de dilatación de la aorta, disminuye su capacidad para distenderse. Hemos observado también que, cuando un aneurisma de la aorta torácica ascendente alcanza un diámetro de seis centímetros —el mismo valor crítico que hallamos en estudios previos sobre la estabilidad de los aneurismas—, el vaso se comporta como un tubo rígido. Esta rigidez maximiza el estrés absorbido por la pared de la aorta cuando la sangre golpea contra ella en cada latido cardíaco; asimismo, explica por qué la situación se complica a menudo cuando un aneurisma alcanza el diámetro crítico de seis centímetros.

Por tanto, es la inflexibilidad de la pared aórtica lo que coloca a un aneurisma cerca del desastre. Pero, ¿qué le empuja hasta el borde del precipicio? Hemos iniciado la categorización de los acontecimientos que hacen que la disección de la pared se produzca en un momento determinado en un individuo susceptible. Según las entrevistas realizadas a los pacientes de nuestra base de datos, tres de cada cuatro recuerdan haber experimentado un intenso episodio de emoción extrema o de esfuerzo físico justo antes de sufrir la disección. Estas situaciones comparten un mismo fenómeno: provocan un fuerte incremento de la presión arterial que desgarra la pared de la aorta vulnerable. Para un determinado tipo de actividad física (halterofilia) disponemos de pruebas que respaldan esta hipótesis. De hecho, este ejercicio puede provocar un estrés excesivo sobre un aneurisma hasta el punto de forzar una crisis, aun cuando la dilatación aórtica no haya alcanzado los seis centímetros de diámetro. Parece lógico conjeturar que los picos de presión arterial desencadenados por otros acontecimientos puedan también inducir una ruptura, aunque todavía no hemos ahondado en esta posibilidad.

Como afirmara Sir William Osler, en el siglo XIX, "no hay enfermedad más propicia para el cultivo de la humildad en la práctica clínica que el aneurisma aórtico". Las investigaciones actuales acerca de la biología y la evolución de los aneurismas torácicos —desde la susceptibilidad genética hasta los acontecimientos físicos y emocionales que causan su rotura o disección— nos ayudan a hacer a esta enfermedad algo menos "humillante".

En cuanto a Carmela, hoy goza de buena salud y ha reemprendido su actividad profesional. "Siento que se me ha dado una segunda oportunidad para vivir", una oportunidad que a su padre no le fue concedida cuando murió a causa de una disección aórtica a los 34 años. Esperamos que nuestra investigación, inspirada por la grave crisis que sufrió esta mujer, brinde a otros la misma oportunidad.

Población de riesgo

Un aneurisma aórtico viene a ser como una bomba con temporizador situada en el interior del tórax. Permanece en silencio hasta que un día se rompe o sufre una disección. Existen varios factores indicadores de la propensión al desarrollo de este trastorno vascular:

- Historia familiar con aneurismas
- Pariente que sufrió un colapso y murió de forma súbita o inesperada
- Síndrome de Marfan o sus signos característicos. Estos incluyen piernas largas, una estructura corporal alta y delgada, y articulaciones laxas (lo que se demuestra, a la derecha, por la habilidad para cruzar el pulgar sobre la palma, mientras se mantiene plana la mano).

Aconsejamos a los pacientes que cumplen algunos de estos criterios —o que tienen previsto practicar halterofilia— que se sometan a una revisión, mediante TAC o ecocardiogramas, para descartar la presencia de aneurismas en la aorta torácica. El levantamiento de pesos no incrementa el riesgo de aneurisma, pero aumenta la posibilidad de que un aneurisma ya existente se convierta, de repente, en letal.

JOHN A. ELEFTERIADES

El autor

John A. Elefteriades estudió medicina y cirugía general y cardiotorácica en la Universidad de Yale, donde ahora es profesor y jefe de cirugía cardiotorácica.

Bibliografía complementaria

SURGICAL INTERVENTION CRITERIA FOR THORACIC AORTIC ANEURYSMS: A STUDY OF GROWTH RATES AND COMPLICATIONS. Michael A. Coady et al. en *Annals of Thoracic Surgery*, vol. 67, n.º 6, págs. 1922–1926; junio 1999.

YEARLY RUPTURE OR DISSECTION RATES FOR THORACIC AORTIC ANEURYSMS: SIMPLE PREDICTION BASED ON SIZE. R. R. Davies, L. J. Goldstein, M. A. Coady, S. L. Tittle, J. A. Rizzo, G. S. Kopf y J. A. Elefteriades en *Annals of Thoracic Surgery*, vol. 73, n.º 1, págs. 17–27; enero 2002.

WEIGHT LIFTING AND RUPTURE OF SILENT AORTIC ANEURYSMS. John Elefteriades et al. en *Journal of the American Medical Association*, vol. 290, n.º 21, pág. 2803; 3 de diciembre, 2003.

PERSPECTIVES ON DISEASES OF THE THORACIC AORTA. John A. Elefteriades en *Advances in Cardiology*, vol. 41, págs. 75–86; 2004.

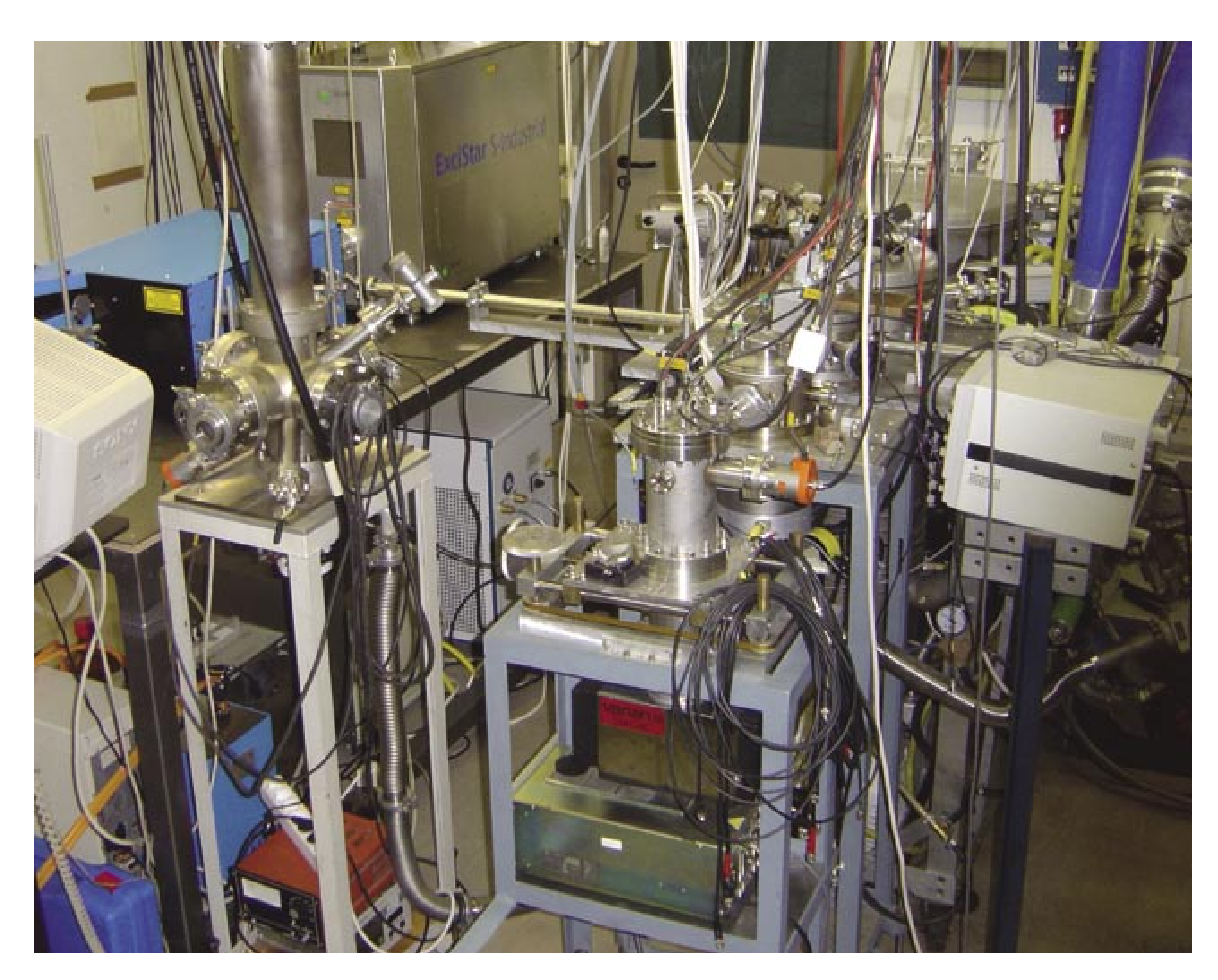
Gotas nanoscópicas de helio a bajas temperaturas

Constituyen un laboratorio idóneo para el estudio de la superfluidez y otros procesos físicos fundamentales. Ofrecen interesantes aplicaciones en el dominio de la espectroscopía molecular y la síntesis química

Manuel Barranco, Ricardo Mayol, Jesús Navarro y Martí Pi

En 1908, Heike Kamerling Onnes consiguió, en su laboratorio de Leyden, licuar el helio enfriándolo hasta 5,2 kelvin, una temperatura nunca alcanzada hasta entonces. Así terminaba con el último miembro de la lista de "gases permanentes" que estableciera Faraday en el siglo XIX para referirse a los que no pueden licuarse por compresión. El helio líquido muestra propiedades harto peculiares. A lo largo de este artículo nos referiremos a dos de ellas. La primera atañe a sus condiciones de solidificación: mientras que, a presión normal, todas las sustancias adoptan el estado sólido cuando se llevan a bajas temperaturas, el helio permanece líquido aunque se enfríe hasta el cero absoluto; para solidificarlo, deben aplicarse presiones superiores a 25 atmósferas. La segunda propiedad corresponde a la superfluidez. Al disminuir la temperatura por debajo de 2,17 K, el helio efectúa una transición de fase: de líquido normal a superfluido, denominado así porque fluye sin viscosidad aparente a través de un capilar. Ambas propiedades constituyen una manifestación macroscópica de efectos genuinamente cuánticos, lo que convierte el helio líquido en el líquido cuántico por excelencia.

El helio natural se presenta en dos formas isotópicas estables: ^{4}He y ^{3}He; la más ligera de ellas en una proporción de sólo el 0,00014 por ciento. Obedecen a estadísticas cuánticas diferentes: el ^{4}He corresponde a un bosón y el ^{3}He a un fermión. Para los fermiones rige el principio de exclusión de Pauli, según el cual dos fermiones idénticos (por ejemplo dos electrones) no pueden hallarse en el mismo estado cuántico. Pero esta restricción no afecta a los bosones. En ciertas condiciones incluso sucede lo contrario: a temperaturas suficiente-



1. **DISPOSITIVO EXPERIMENTAL** utilizado para la producción, dopaje y detección de gotas de helio.

CORTESIA DE FRANK STIENKEMEIER, UNIVERSIDAD DE BIELEFELD

mente bajas, los bosones tienden a ocupar el mismo estado cuántico. De hecho, la superfluidez del ^{4}He líquido se debe a que, en ausencia de energía térmica, todos sus átomos se comportan de forma coherente, como lo hace un gas de bosones a temperaturas próximas al cero absoluto [*véase* "Mecánica cuántica de los condensados de Bose-Einstein", por Arturo Polls, Jordi Boronat y Ferran Mazzanti, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2001]. El ^{3}He líquido se torna también superfluido, pero a temperaturas mucho menores que el ^{4}He, por debajo de 2,7 milikelvin. La superfluidez del ^{3}He se relaciona con la formación de pares de átomos, análogos a los pares de electrones responsables de la superconductividad en ciertos metales.

Gotas nanoscópicas

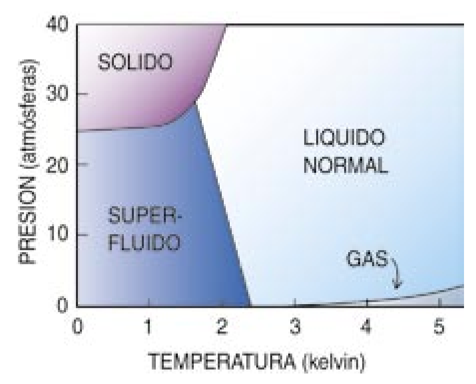
En el laboratorio se experimenta con muestras de unos milímetros o centímetros cúbicos de helio, que contienen del orden de 10^{18} a 10^{21} átomos. Se trata, pues, de sistemas macroscópicos. Los físicos se interesan por los cambios que sufren las propiedades del helio líquido cuando el tamaño de la muestra disminuye, hasta llegar incluso a dos átomos. Cuando el número de átomos de helio es inferior a 10^7, las dimensiones de la muestra se encuentran en el dominio de los nanómetros; el sistema recibe el nombre de nanogota. Su estudio reviste interés no sólo conceptual, sino también práctico.

A finales de los años ochenta y principios de los noventa, se descubrió que las nanogotas de helio capturan con facilidad átomos o moléculas que hallen a su paso. Este fenómeno atrajo el interés de los químicos, quienes vieron en las gotas de helio el laboratorio idóneo para la espectroscopía molecular de alta resolución. A su vez, los espectros de las moléculas capturadas revelan cuestiones básicas sobre la estructura de las gotas.

Los átomos de los gases nobles (helio, neón, argón, etc.) presentan una estructura electrónica de capas cerradas, que les confiere estabilidad química, o poca reactividad. La estructura del helio (dos electrones que llenan la primera capa) constituye la más estable de todas ellas. La interacción entre dos átomos de helio se debe a la polarización que la carga de un átomo induce en la del otro. Resulta notablemente repulsiva cuando la distancia que los separa es inferior a 2,5 angstrom; a distancias ligeramente superiores, los átomos experimentan una débil atracción de unos 10 K, que disminuye rápidamente a medida que aumenta la separación.

Debido a su reducida masa, la energía del punto cero (estado de mínima energía, nunca nula, que pueden adoptar los átomos de un sistema cuántico) de un átomo de helio viene a ser del mismo orden que la energía de atracción entre dos de ellos. A consecuencia de este delicado balance energético, dichos átomos se hallan en constante movimiento (lejos de estabilizarse en sus posiciones de equilibrio); por tanto, el helio permanece líquido incluso en el cero absoluto. Los cálculos teóricos indican que esta situación se mantiene incluso para agregados de un número muy pequeño de átomos de helio. No ocurre lo mismo en los otros gases nobles. Por un lado, su mayor masa atómica se traduce en una menor energía del punto cero (ambas magnitudes dependen inversamente la una de la otra); por otro, la atracción entre dos átomos es mayor que en el caso del helio.

El balance energético favorece la localización de los átomos: los agregados de estos elementos adoptan una estructura cuasicristalina. Así, mientras los agregados de átomos de helio constituyen nanogotas, los de otros gases nobles forman nanosólidos.



2. ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE FASES del ^{4}He. El helio líquido sólo se solidifica a presiones muy elevadas (superiores a 25 atmósferas). Al disminuir la temperatura (por debajo de 2,17K) se produce otra transición de fase: de líquido normal a superfluido.

Cómo se preparan las nanogotas

Para producir agregados neutros de sustancias gaseosas se utiliza a menudo la técnica de expansión supersónica. El gas, muy puro, contenido en un recipiente a alta presión y baja temperatura fluye por una tobera y se expande en un recinto donde se ha hecho un vacío muy elevado. En el transcurso de la expansión, la temperatura disminuye rápidamente; los cambios en el estado termodinámico del gas se describen mediante una expansión adiabática. Las colisiones entre átomos conducen a la formación de agregados, que contienen un gran número de átomos (10^6 o 10^7). Luego se produce una intensa evaporación, que reduce el tamaño y la temperatura de las nanogotas. Estas suelen llegar al equilibrio térmico tras recorrer un metro en unos pocos milisegundos. Estudios teóricos y experimentales han determinado que se alcanzan temperaturas de 0,40 K y 0,15 K para gotas de ^{4}He y ^{3}He, respectivamente. Al final del recorrido, éstas se analizan mediante un espectrómetro de masas.

Entre la tobera y el espectrómetro se colocan diversos dispositivos que controlan las características de las nanogotas. Pensemos en un filtro de velocidades. Se basa éste en dos orificios alineados con el haz que se abren y cierran de forma sincronizada, de tal forma que los agregados que atraviesen el primer orificio puedan atravesar el segundo si el tiempo de vuelo entre los dos coincide con un valor predeterminado. Así se controla la velocidad.

Para conocer el tamaño de las gotas se coloca a continuación una cámara de reacción, donde los agregados colisionan con átomos o moléculas producidos en un haz secundario. Puesto que las velocidades están predeterminadas, las masas se deducen a partir del ángulo de deflexión del haz primario. Variando las condiciones iniciales de presión y temperatura se puede controlar la distribución de masas. Por ejemplo, con presiones de 20 atmósferas y temperaturas de 12 a 15 K se obtienen gotas con $3 \times 10^3 – 10^4$ átomos. A presión fija, un aumento de la temperatura produce gotas de menor tamaño, y viceversa.

En cuanto a la detección final, la espectrometría de masas no resulta adecuada para las gotas de pocos átomos, pues no distingue entre las señales producidas por masas peque-

BOSONES
FERMIONES
TEMPERATURA ELEVADA
TEMPERATURA BAJA
ESTADOS CUANTICOS
NUMERO DE BOSONES
NUMERO DE FERMIONES

3. ESTADISTICAS CUANTICAS para fermiones y bosones. Siguiendo el principio de exclusión de Pauli, los fermiones nunca ocupan el mismo estado cuántico. Los bosones, en cambio, no cuentan con esta restricción; a temperaturas muy bajas llegan incluso a agruparse en el mismo estado cuántico.

ñas y las originadas por la fragmentación de gotas mayores. Además, las gotas pequeñas pueden ionizarse por completo, debido a su débil ligadura. Para tales dimensiones, el grupo que dirige Peter Toennies, de la Universidad de Gotinga, ha utilizado una técnica no destructiva, basada en una red de difracción. Han detectado sistemas ligados ^4He_N formados por unos 43 átomos, o menos. Por ejemplo, el dímero $^4He_2$, sin duda, la mayor molécula diatómica (52 ± 4Å). Su energía de enlace se estima en sólo 1,1 mK —del orden de la diezmillonésima de electronvolt.

Este resultado está en acuerdo cualitativo con los cálculos teóricos, que indican un valor de entre 1,3 y 1,7 mK, variable en función del modelo que se use para describir la interacción entre dos átomos de helio. Varios modelos reproducen el valor experimental de la energía por partícula del líquido, que se conoce con una precisión de una centésima de K. Igual que en el caso del helio líquido, la energía de enlace del dímero resulta de un delicado balance entre las energías cinética (del punto cero) y potencial (de atracción); los cálculos indican para éstas valores del orden de 8 y –9 mK, respectivamente.

La interacción entre dos átomos de helio es, en esencia, la misma para ambos isótopos. Por ello, revisten mayor interés las gotas isotópicamente puras, así como las mezcladas, es decir, sistemas de bosones y fermiones de distinta masa, aunque ligados por la misma fuerza. Permiten estudiar efectos relacionados con las diferentes estadísticas cuánticas y energías del punto cero.

Mezclas isotópicas

La interacción entre dos átomos de helio resulta fuertemente repulsiva a cortas distancias y atractiva, a distancias intermedias. Cuando la interacción es de corto alcance, cada átomo de helio interactúa sólo con unos pocos a su alrededor, a diferencia de lo que sucede en el caso de la gravedad u otra fuerza de largo alcance. Por tanto, conforme aumenta el número de átomos de la gota, su energía de ligadura por átomo, así como su densidad central, tienden a los valores del líquido uniforme. Por todo ello se dice que las gotas de helio constituyen sistemas autoligados y saturantes.

Debido al principio de exclusión de Pauli y a la menor masa del átomo de ^3He, una gota de ^3He está menos ligada que una de ^4He (con el mismo número de átomos). De hecho, los cálculos teóricos muestran que el dímero $^3He_2$ no está ligado; se requiere un mínimo de unos 30 átomos de ^3He para formar una gota autoligada. Experimentalmente todavía no se ha logrado determinar dicho valor "crítico", pero todo parece apoyar su existencia: a diferencia de lo que sucede con el ^4He (que forma gotas ligadas a partir de cualquier número de átomos), en ningún caso se han observado gotas pequeñas de ^3He; hasta la fecha, sólo se han detectado agregados de varios miles de átomos.

El principio de exclusión de Pauli condiciona también la distribución energética de los átomos de ^3He en una gota (cómo se reparten en niveles, o capas, de energía). Cuando el número de fermiones, N, es tal que todos los estados de una capa quedan ocupados, el sistema muestra mayor estabilidad. Se trata de los números "mágicos". Según los cálculos teóricos, en el caso de nanogotas de ^3He, los primeros números mágicos corresponden a los valores de $N = 2$, 8, 20, 40, 70, 112, 168... Lo mismo sucede en el caso de agregados metálicos de átomos alcalinos [*véase* "Propiedades de los microagregados metálicos", por María Pilar Iñiguez y Julio A. Alonso, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1990].

El estudio de las mezclas isotópicas resulta fascinante. A temperaturas

4. LA SUPERFLUIDEZ del helio se manifiesta a temperaturas inferiores a los 2,17 K. Debido a la ausencia de viscosidad aparente, el superfluido "trepa" por las paredes del recipiente hasta alcanzar el borde y rebosar.

ESCALAS DE TEMPERATURA Y UNIDADES DE ENERGIA

La escala absoluta de temperatura es independiente de las propiedades de cualquier sustancia. La temperatura absoluta (T) se mide en grados kelvin (K). Un kelvin coincide con un grado de la escala Celsius; el cero absoluto corresponde a –273,15 ºC. De acuerdo con el tercer principio de la termodinámica, el cero absoluto resulta inalcanzable en un número finito de pasos. En el proceso de enfriamiento de gases atómicos mediante láseres para producir condensados de Bose-Einstein se han alcanzado las menores temperaturas absolutas: del orden del nanokelvin (10^{-9} K o milmillonésima de kelvin).

Dejando de lado el sistema internacional, lo más común es utilizar sistemas de unidades adaptadas al sistema físico en estudio. En la física de la materia condensada, la energía se suele medir con el electronvolt (eV), que equivale a $1{,}602 \times 10^{-19}$ joule (J), o su milésima parte, el meV. En la física de muy bajas temperaturas, la energía se mide en unidades de temperatura absoluta. Ello se debe a que la constante de Boltzmann ($k = 1{,}381 \times 10^{-23}$ JK^{-1}), multiplicada por T, tiene dimensiones de energía. En espectroscopía, se cuantifica la energía en términos de número de onda o cm^{-1}. Resultan así las siguientes equivalencias: 1 K = 0,695 cm^{-1} = $8{,}617 \times 10^{-5}$ eV.

EL MOVIMIENTO DEL PUNTO CERO

Según la física clásica, el movimiento de los átomos se ralentiza al disminuir la temperatura, hasta cesar por completo cuando se alcanza el cero absoluto de temperatura. La física cuántica muestra, en cambio, que, incluso en el cero absoluto, un cuerpo puede estar en movimiento.

Este fenómeno se puede explicar a partir del principio de indeterminación de Heisenberg. A un átomo de masa m localizado en una región espacial de dimensión Δx, le corresponde un momento lineal $\Delta p \approx h/\Delta x$, siendo h la constante de Planck. En consecuencia, el átomo cuenta con una energía cinética dada por $h^2/[2m(\Delta x)^2]$, que corresponde a la energía del punto cero. Esta energía puede ignorarse a temperaturas elevadas, pues la energía cinética total es básicamente térmica y proporcional a kT. A bajas temperaturas, sin embargo, sucede lo contrario: en las proximidades del cero absoluto, la energía térmica es despreciable frente a la del punto cero.

Para estimar esa energía en el caso del helio, imaginemos un átomo en un pequeño volumen limitado por los demás átomos, de forma que la distancia Δx antes mencionada puede considerarse el doble de la distancia media entre ellos. Teniendo en cuenta que las densidades atómicas del helio líquido a temperaturas próximas al cero absoluto y a cero atmósferas de presión son 0,022 y 0,016 átomos/Å^3, respectivamente para los isótopos ^{4}He y ^{3}He, obtenemos una energía del punto cero de 12 K y 13 K. Estos valores resultan comparables a la atracción de 10 K que existe entre dos átomos de helio. A consecuencia de este delicado balance energético, dichos átomos se hallan en constante movimiento (lejos de estabilizarse en sus posiciones de equilibrio, como sucede en el estado sólido); por tanto, el helio permanece en estado líquido incluso en el cero absoluto.

FISICA CLASICA

FISICA CUANTICA

Los átomos se mueven debido a la energía térmica

TEMPERATURAS ELEVADAS

Los átomos se mueven debido a una energía básicamente térmica

En ausencia de temperatura, los átomos permanecen inmóviles

CERO ABSOLUTO

Aun en ausencia de temperatura, los átomos se mueven debido a la energía del punto cero

muy bajas, los líquidos ^{4}He y ^{3}He no se mezclan en cualquier proporción. En concreto, cerca del cero absoluto y a la presión de cero atmósferas, se alcanza una concentración máxima de ^{3}He en ^{4}He del 6,6 por ciento. A concentraciones mayores, se produce una segregación del ^{3}He y aparecen dos fases líquidas: una formada por ^{3}He puro y la otra por una mezcla isotópica a la concentración máxima de ^{3}He. Incluso a concentraciones inferiores a la máxima, el ^{3}He se resiste a disolverse en ^{4}He. Si en un recipiente con ^{4}He líquido se añaden átomos de ^{3}He, éstos se sitúan en la superficie libre del líquido, formando una película cuasibidimensional. Ello se debe a que los estados de menor energía accesibles al ^{3}He se encuentran precisamente en la superficie del ^{4}He. Sólo cuando éstos, los estados de Andreev, se han ocupado por completo, el ^{3}He empieza a disolverse en el volumen.

La existencia de los estados de Andreev se explica por la diferencia entre las energías del punto cero de cada isótopo: el exceso de energía cinética de un átomo de ^{3}He con respecto a la de uno de ^{4}He empuja el ^{3}He hacia la superficie. Las propiedades superficiales del ^{4}He líquido cambian, pues, de forma notable cuando se añade ^{3}He, incluso en pequeñas proporciones.

En el caso de gotas mezcladas, cabe preguntarse cómo se distribuirán los isótopos en el interior del agregado, cómo cambiarán los números "mágicos" y la estructura de niveles energéticos de los átomos de ^{3}He, o qué ocurrirá si, partiendo de un agregado inestable de ^{3}He, se reemplazan átomos de ^{3}He por átomos de ^{4}He. Los átomos de ^{4}He deberían proporcionar una ligadura adicional a los de ^{3}He; para combinaciones apropiadas de números de átomos de cada isótopo se podrían formar gotas mezcladas autoligadas con menos de 30 átomos de ^{3}He. De hecho, sabemos que así ocurre. El grupo de Toennies ha detectado ^4He_N-^{3}He, con N = 2-6, y otros agregados estables. Cálculos teóricos realizados por los autores indican que dos átomos de ^{4}He pueden ligar hasta 4 átomos de ^{3}He, o bien más de 17; las demás combinaciones forman estados ligados, si bien algunas de ellas son metaestables, es decir, les resulta energéticamente más ventajoso romperse en agregados estables de menor tamaño. La estabilidad de una gota mezclada dependerá de la combinación de

distintos comportamientos cuánticos y masas atómicas.

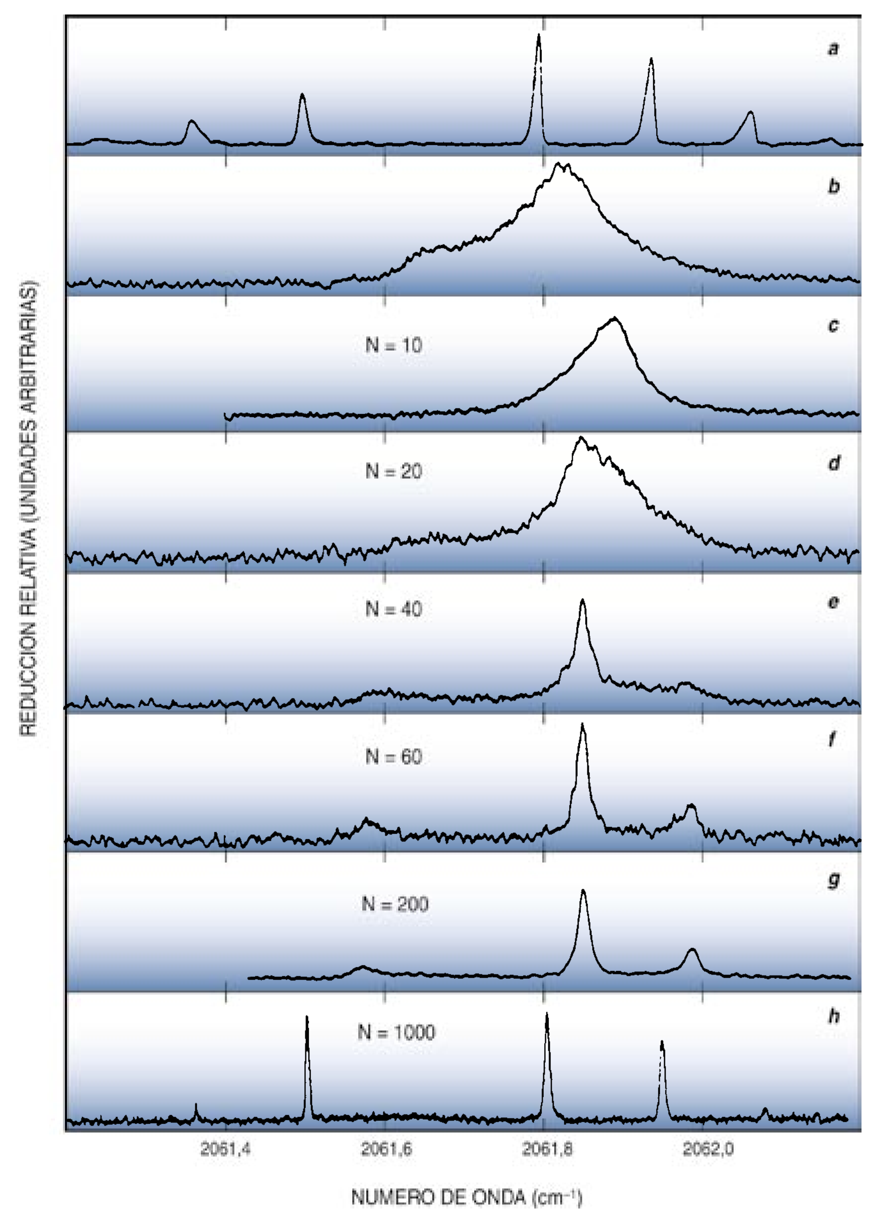
Las gotas mixtas reproducen, a escala nanoscópica, la estructura del líquido antes comentada. Los átomos de ^{4}He se localizan en el interior de la gota, mientras que los de ^{3}He lo hacen en la superficie. Este comportamiento muestra que las gotas de ^{4}He también poseen estados superficiales de Andreev con una notable capacidad de almacenar átomos de ^{3}He. Como veremos más adelante, ello reviste mayor interés.

Espectroscopía molecular

El conocimiento de la estructura de una molécula proviene, en buena medida, del estudio experimental de su espectro energético (que revela la distribución de los niveles energéticos característica de cada sistema cuántico). Pero cuando se trata de una molécula compleja, esta técnica resulta inadecuada: los espectros presentan numerosos picos de energía (correspondientes a numerosos niveles) tan próximos entre sí que, en la práctica, resulta difícil discriminarlos. El problema se agrava porque la anchura de los picos aumenta con la temperatura, complicando aún más su resolución. Para mitigar el problema térmico, se recurre al estudio de haces moleculares, pues, tal como ya hemos indicado en el caso del helio, en una expansión adiabática la temperatura de las moléculas disminuye. Aun así, las temperaturas finales resultan demasiado elevadas, del orden de 1 K, en parte por limitaciones técnicas y en parte para evitar que las moléculas formen agregados.

Por ello se ha explorado otro enfoque: depositar las moléculas sobre substratos inertes a temperaturas ultrabajas. En un substrato sólido, la interacción entre éste y la molécula depositada depende de la orientación relativa, lo que introduce una complicación adicional. Nada de eso ocurre, en cambio, si el substrato consiste en helio líquido. Sin embargo, resulta muy difícil evitar que las moléculas inyectadas en el helio líquido formen agregados, que se condensen sobre las paredes del recipiente o se produzcan otros efectos no deseados. Además, esta técnica no resulta aplicable a cualquier tipo de molécula.

Para superar tales obstáculos, en los últimos años se ha desarrollado otra opción más conveniente: implantar átomos y moléculas en nanogotas de helio en vuelo. A pesar de algunas limitaciones, esta técnica permite inyectar, en principio, todo tipo de moléculas y facilita la detección de las gotas dopadas. Se basa en hacer pasar un haz de nanogotas a través de una cámara de reacción que contiene un gas de impurezas a muy baja presión, alrededor de 10^{-8} atmósferas. El tamaño típico de estos agregados, que puede controlarse variando la presión y la temperatura en la fuente, oscila entre los 10^{3} y los 10^{5} átomos. Las gotas capturan entonces una única molécula, que, al adentrarse en el agregado, pierde su energía cinética, provocando la evaporación de un gran número



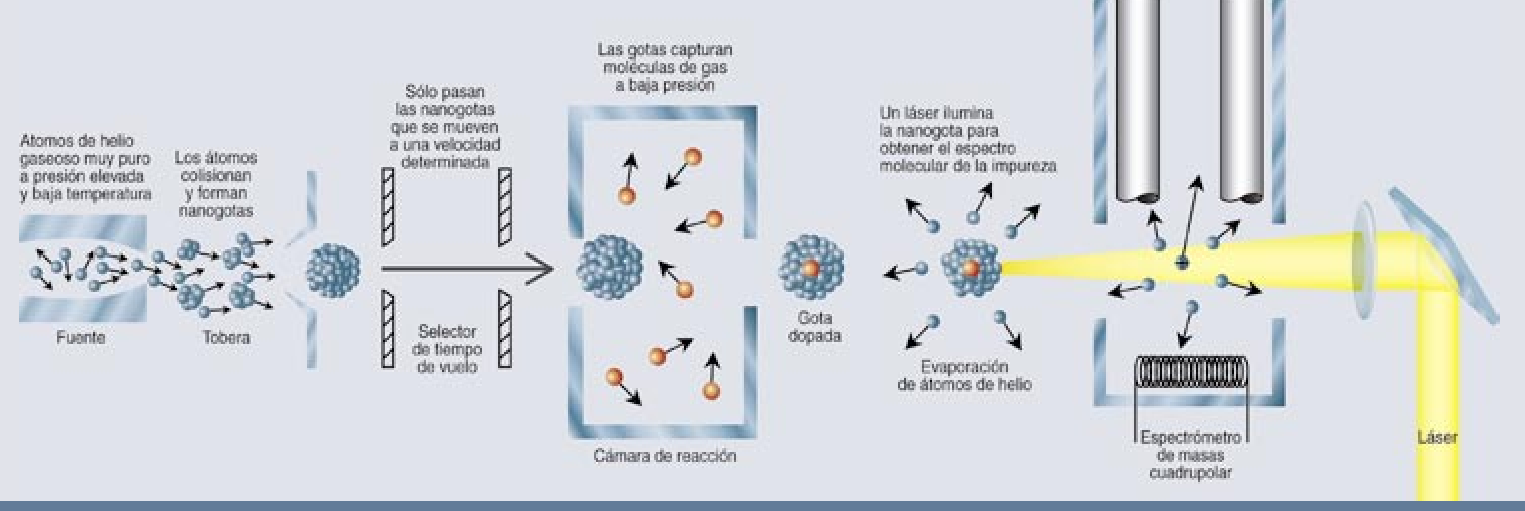
5. ESPECTRO ROTO-VIBRACIONAL DE ABSORCION de una molécula de sulfuro de carbonilo (OCS) en gotas de helio. En la parte superior aparecen los espectros del OCS en gotas de helio puras: ^{4}He (*a*) y ^{3}He (*b*). Las gráficas inferiores corresponden a la señal en una gota de ^{3}He a la que se han añadido *N* átomos de ^{4}He (*c-h*). En ^{4}He muestra los picos nítidos característicos de una gota superfluida (*a*). El ^{3}He, en cambio, produce una banda ancha (*b*). A medida que se añaden átomos de ^{4}He a la gota de ^{3}He, el espectro sufre ligeras modificaciones. Cuando *N* = 60, aparecen picos definidos, que indican la manifestación de superfluidez en el entorno de la molécula de OCS.

CORTESIA DE PETER TOENNIES, INSTITUTO MAX PLANCK, GOTINGA

OBTENCION Y ANALISIS DE NANOGOTAS DE HELIO

Para producir agregados neutros de sustancias gaseosas se utiliza a menudo la técnica de expansión supersónica. En una fuente se almacena helio gaseoso muy puro a presión elevada (entre 10 y 200 atmósferas) y baja temperatura (entre 3 y 20 K). Las gotas se producen por la expansión adiabática del gas a través de una tobera de entre 5 y 10 micrometros de diámetro. Se detectan en un espectrómetro de masas cuadrupolar, tras pasar por un ionizador por impacto de electrones. La distancia entre la fuente y el espectrómetro viene a ser de dos o tres metros.

Se puede controlar la velocidad de las gotas (del orden de 10^3 m/s) haciéndolas pasar por un selector de tiempo de vuelo, donde la apertura de dos orificios alineados se sincroniza adecuadamente. En una cámara de reacción, las gotas capturan moléculas en fase gaseosa a baja presión. Ello produce un exceso de energía que provoca la evaporación de varios centenares de átomos; las gotas dopadas recuperan así la temperatura que tenían antes de entrar en la cámara. Para obtener el espectro molecular de la impureza, las gotas se iluminan con un láser; cada molécula excita entonces su estado roto-vibracional. Al desexcitarse, emite energía que la gota utiliza para volver a evaporar átomos de helio. Se reduce así el tamaño de las gotas y, por tanto, también la probabilidad de ser ionizadas, así como la señal detectada en el espectrómetro.



¿COMO SE DETECTAN LAS GOTAS MAS PEQUEÑAS?

En el caso de las gotas de helio con pocos átomos, la espectrometría de masas no resulta adecuada para detectarlas, pues no distingue entre las señales producidas por masas pequeñas y las originadas por la fragmentación de gotas mayores. Además, las gotas con pocos átomos corren el peligro de ionizarse por completo, debido a su débil ligadura.

Para detectar las gotas más pequeñas se recurre a una técnica no destructiva: la difracción. Las gotas con pocos átomos de helio cuentan con una mayor longitud de onda cuántica asociada (magnitud inversamente proporcional a la masa de la partícula). Ello permite aprovechar su comportamiento ondulatorio para determinar, mediante una red de difracción, el tamaño (número de átomos) de las gotas.

M. BARRANCO, R. MAYOL, J. NAVARRO Y M. PI

de átomos de helio. Se trata de un proceso muy rápido: en cuestión de microsegundos, las gotas alcanzan un equilibrio térmico en torno a 0,4 K en el caso del ^{4}He y a 0,15K en el caso del ^{3}He. En estas condiciones, el ^{4}He es superfluido mientras que el ^{3}He es un líquido normal. Las gotas así dopadas se analizan en vuelo, cuando salen de la cámara de reacción. Se las ilumina con un láser, cuya frecuencia se ajusta al rango de energías del espectro de la molécula capturada, para que ésta se excite al absorber la radiación. Así se resuelve el problema de la temperatura antes mencionado.

En una serie de experimentos realizados a mediados de los años noventa, Toennies y su grupo resolvieron por primera vez el espectro roto-vibracional de moléculas de hexafluoruro de azufre (SF_6) capturadas en nanogotas de ^{4}He. El espectro corresponde al que cabría esperar si la molécula girara casi libremente en el interior del agregado. Ello indica que la gota de ^{4}He es superfluida, pues en caso contrario la fricción entre el SF_6 y los átomos de helio circundantes inhibiría la rotación. Además, constituye una muestra del potencial que las gotas de ^{4}He ofrecen para la espectroscopía molecular de alta resolución.

Síntesis química

Aunque la interacción entre la molécula capturada y los átomos de helio es débil, no se puede despreciar. Sucede así que ciertos complejos moleculares presentan una morfología harto distinta en fase gaseosa y en el interior de las gotas.

En un experimento realizado en 1998, Roger Miller y sus colaboradores, de la Universidad de Carolina del Norte, lograron introducir varias moléculas de cianhídrico (HCN) en una nanogota de ^{4}He. (Aumentando la presión de vapor en la cámara de reacción se puede lograr que una misma gota capture varias moléculas.)

Las moléculas de HCN presentan una estructura lineal; sin embargo, cuando interaccionan en fase gaseosa forman cadenas plegadas e incluso ciclos, si se agregan más de tres. Ahora bien, el grupo de Miller observó que, en el interior de gotas formadas por unos 4000 átomos de ^{4}He, las moléculas de HCN se ordenan formando cadenas lineales. Consiguieron alinear hasta ocho moléculas de HCN, el máximo número posible considerando el diámetro de la gota y la longitud de la molécula.

Dicha estructura lineal corresponde a un estado metaestable de los agregados $(HCN)_N$ —siendo *N* el número de moléculas que forman el agregado—, accesible cuando éstos se forman en el interior de las gotas pero no cuando se producen por condensación, tras la expansión adiabática de un haz de moléculas de HCN. Existen otros ejemplos de síntesis de un complejo metaestable en el interior de gotas de ^{4}He a muy baja temperatura. Estas nanogotas ofrecen un medio idóneo para preparar moléculas inestables, que no podrían obtenerse de otra forma.

Las moléculas inyectadas en gotas de helio constituyen, a su vez, "sondas" que permiten inferir propiedades del medio que las rodea; por ejemplo, la temperatura. La intensidad de las líneas del espectro molecular depende de la temperatura de la gota. A partir de la intensidad relativa de las distintas líneas espectrales de la molécula inyectada se han determinado las temperaturas antes mencionadas de las gotas de ^{4}He y ^{3}He, predichas teóricamente varios años antes.

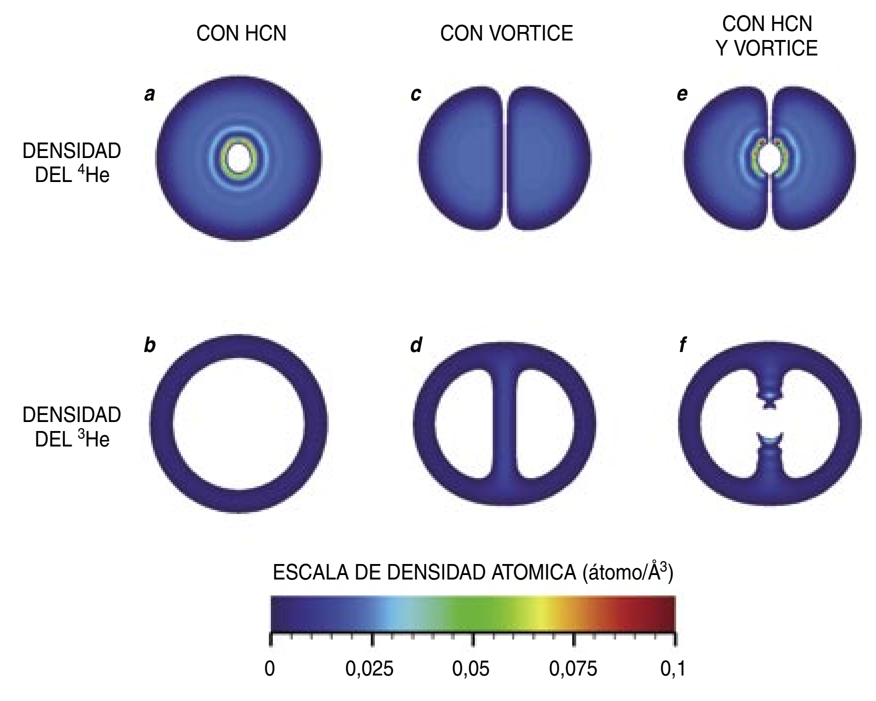
Superfluidez

El mayor impacto que el análisis de impurezas moleculares en gotas de helio ha producido en el campo de la física de la materia condensada guarda relación con el estudio de la superfluidez a escala nanoscópica. Como hemos comentado, la rotación cuasilibre de moléculas en gotas de ^{4}He prueba que dichas gotas se hallan en fase superfluida. Se plantea entonces una cuestión: ¿cuál es el número mínimo de átomos de helio que debe haber en la gota para que ésta sea superfluida?

En las postrimerías de los años ochenta del siglo pasado, dos grupos estudiaron las propiedades de las nanogotas de ^{4}He. David Ceperley y sus colaboradores, de la Universidad de Illinois en Urbana, calcularon su calor específico; el equipo de Birgitta Whaley, de la Universidad de California en Berkeley, su espectro de excitación. De ambos trabajos se concluye que los sistemas formados por unos 60 átomos de ^{4}He muestran propiedades semejantes a las del líquido superfluido.

Casi dos decenios mas tarde, en 1997, otro experimento llevado a cabo por el grupo de Toennies pareció corroborarlo. Analizaron el espectro infrarrojo de moléculas de sulfuro de carbonilo (OCS) en el interior de nanogotas de ^{4}He y de ^{3}He, de unos 10^4 átomos en cada caso. En las gotas de ^{4}He se observaron picos muy estrechos, característicos de un medio superfluido, mientras que en las de ^{3}He sólo apareció un pico muy ancho, propio de un líquido viscoso. Veamos cómo influye la viscosidad en el espectro molecular.

En el superfluido, los primeros estados rotacionales excitados se encuentran a energías casi inaccesibles para los átomos que se hallan en el estado fundamental (excitarlos cuesta mucha energía). Ello hace que cuando la molécula de OCS absorbe un fotón procedente del láser y gira (porque "asciende" a un estado rotacional de mayor energía), el superfluido que la rodea no intercambie momento ni energía con ella —sólo algunos átomos de ^{4}He giran de forma solidaria con la molécula, por inercia— y, por tanto, aparezca en el espectro un pico nítido, sin "contaminación" rotacional. En un líquido normal, en cambio, incluso si se trata de un líquido cuántico como el ^{3}He a temperaturas superiores a 3 mK, los estados rotacionales excitados se encuentran a energías accesibles incluso a bajas temperaturas. Así, cuando el OCS gira en su interior, algunos de los átomos del líquido se excitan también. Este es el origen microscópico de la viscosidad. La excita-



6. DENSIDADES ATOMICAS de una gota formada por 500 átomos de ^{4}He y 100 átomos de ^{3}He, en función de la presencia de impurezas y vórtices. Las gráficas superiores corresponden a la densidad del ^{4}He; las inferiores a la del ^{3}He. Cuando se añade una molécula de HCN, los átomos de ^{4}He se distribuyen en capas de solvatación a su alrededor (*a*); los átomos de ^{3}He, en cambio, ocupan los estados de Andreev (superficiales) (*b*), sin distorsionar el entorno superfluido que ofrece el ^{4}He. Si, en lugar de dopar la gota, se crea un vórtice lineal, el ^{4}He superfluido se expulsa del núcleo del vórtice (*c*), que pasa a ser ocupado por el ^{3}He (*d*). La combinación de impureza y vórtice da lugar a una superposición de los estados anteriores (*e* y *f*).

M. BARRANCO, R. MAYOL, J. NAVARRO Y M. PI

ción se transmite hasta la superficie de la gota, causando la evaporación de un cierto número de átomos de ^{3}He. Esta disipación de la energía de rotación de la molécula de OCS provoca el ensanchamiento del pico del espectro.

Toennies observó otro fenómeno de sumo interés: si se añaden cantidades crecientes de átomos de ^{4}He a gotas de ^{3}He dopadas con una molécula de OCS, el espectro de la impureza, inicialmente formado por un ancho pico, se resuelve nítidamente cuando el número de átomos de ^{4}He alcanza los sesenta. En la opinión del grupo de Gotinga, ello se debe a que los átomos de ^{4}He añadidos a la gota de ^{3}He dopada se difunden con gran rapidez hacia su interior, solvatando (rodeando) la molécula de OCS y expulsando de forma progresiva a los átomos de ^{3}He adyacentes. Cálculos teóricos llevados a cabo posteriormente por los autores respaldan esta hipótesis. Sesenta, el número de átomos de ^{4}He necesarios para expulsar al ^{3}He del entorno de la molécula, corresponde también, por tanto, a la cantidad mínima de átomos de ^{4}He que se requiere para que se manifieste la superfluidez; una cantidad menor, alrededor de veinte o treinta, completan la primera capa de solvatación del OCS.

Además de constituir un medio inerte, las gotas isotópicamente mezcladas ofrecen una ventaja adicional: permiten alcanzar temperaturas ultrabajas. En el interior de la gota encontramos el ^{4}He rodeando la molécula capturada; la superficie, en cambio, está formada sólo por ^{3}He. Por tanto, la gota se enfriará, por la evaporación de los átomos de la superficie, hasta los 0,15 K característicos de las gotas de ^{3}He puro —y no los 0,4 K típicos del ^{4}He.

Reviste particular importancia para la rotación de las moléculas solvatadas en ^{4}He el hecho de que su momento de inercia sea notablemente mayor que cuando están en fase gaseosa. (Ya hemos indicado que parte del helio gira, debido a su inercia, de forma solidaria con la impureza.) Ello implica que, aunque ésta gire casi libremente, su espectro no coincide del todo con el de la molécula en fase gaseosa. Cuantificar esta diferencia o, lo que es lo mismo, determinar los momentos de inercia de las moléculas solvatadas, constituye un verdadero reto teórico. Por un lado, requiere un conocimiento preciso del potencial de interacción entre la molécula y el helio —un problema clásico de química teórica, de enorme complejidad aun en el caso de moléculas simples—. Por otro, la presencia de una impureza en la gota de helio distorsiona la densidad del fluido que la rodea. Para calcular el momento de inercia, no basta con conocer la distribución de materia alrededor de la molécula solvatada, sino que, además, es preciso determinar localmente el grado de superfluidez del helio. A pesar de los avances en la simulación teórica de la distribución de la densidad superfluida de la nanogota, la cuestión sigue abierta.

Torbellinos cuánticos

Una de las consecuencias de la superfluidez del helio a bajas temperaturas es la resistencia que opone a girar cuando lo hace el recipiente que lo contiene. Aparecen en su interior vórtices o torbellinos con una característica intrínsecamente cuántica: su momento angular no toma cualquier valor, como sucede en un líquido ordinario, sino sólo unos determinados. La circulación del líquido alrededor del vórtice está, pues, cuantizada. Puesto que las moléculas solvatadas permiten estudiar la superfluidez de las gotas de helio, se plantea también si pueden utilizarse para detectar la existencia de vórtices en gotas superfluidas, e incluso si la presencia de estas impurezas puede ayudar a generar y estabilizar vórtices.

La descripción física de estos vórtices constituye un aspecto esencial de nuestra comprensión de la superfluidez en el helio líquido y, más recientemente, en los condensados de Bose-Einstein.

Para lo que nos ocupa, conviene saber que existen dos formas de generar vórtices cuantizados en helio líquido. Una de ellas consiste en hacer girar el recipiente que lo contiene por encima de una velocidad crítica a partir de la cual aparecen vórtices lineales, paralelos al eje de rotación. (Esta técnica se ha utilizado también en los condensados de Bose-Einstein, en cuyo caso se hace girar la trampa magnética que mantiene confinado el agregado atómico.) La otra se basa en desplazar, por el interior del superfluido, partículas a una velocidad superior un valor crítico (límite de Landau); el movimiento de la impureza provoca la formación de vórtices.

En el caso de las nanogotas, las mayores expectativas se centran en el segundo método. Aunque aún no se ha verificado experimentalmente, se supone que la impureza transfiere a la gota no sólo su energía cinéti-

VORTICES EN GOTAS DE HELIO

Nuestro conocimiento del helio superfluido debe mucho a los estudios sobre vórtices o torbellinos en su interior. Guardan similitud con los que aparecen en los líquidos viscosos, con una salvedad: su velocidad de circulación sólo toma determinados valores. Ello revela su origen cuántico e implica la existencia de una correlación macroscópica inusual en el superfluido. Los vórtices lineales, generados en torno al eje de rotación, son los más sencillos. Cuanto más nos acercamos a su eje, mayor es la velocidad de circulación; ello causa la expulsión del ^{4}He de esa región del fluido.

Las líneas de vórtice muestran propiedades sorprendentes. Por una parte, cuentan con una sección transversal extraordinariamente pequeña, de 1 a 2 Å de radio, menor que la distancia media entre los átomos de ^{4}He (2,5 Å); su longitud, en cambio, puede alcanzar dimensiones macroscópicas. Por otra parte, no se cortan ni pueden acabar en el interior del superfluido: lo hacen en las paredes del recipiente (*derecha*) o bien plegándose sobre sí mismas, formando anillos o madejas (*izquierda*).

ca, sino también parte del momento angular orbital. Ello favorecería la nucleación de vórtices.

La captura de moléculas no sólo ofrecería un método para generar vórtices en gotas de helio, sino también para estabilizarlos y detectarlos. En efecto, la formación de un vórtice en helio superfluido conlleva la aparición de un movimiento colectivo de rotación del líquido alrededor del mismo y, por tanto, un aumento en la energía cinética del superfluido. El superfluido pasa entonces de su estado fundamental a otro excitado pero inestable: eventualmente, el sistema regresa a su estado no excitado, evaporando átomos o incluso fisionándose en dos gotas menores. Así se libera el exceso de energía y momento angular depositados en la gota en el momento de la nucleación del vórtice. Una impureza, en cambio, anclaría el vórtice en el interior de la gota, estabilizando el sistema.

Este anclaje se produce en gotas de tamaño semejante a las que se utilizan en los experimentos actuales. Reviste mayor interés el ejemplo de las moléculas lineales, como el OCS o HCN antes citadas, o sus complejos $(OCS)_n$ o $(HCN)_n$, también lineales. En estos casos, el eje del vórtice y el de la molécula se alinean, dotando al sistema de mayor rigidez. Al propio tiempo, el vórtice causa una distorsión suplementaria en el entorno de la molécula, aumentando su anisotropía. Se espera que este fenómeno provoque cambios en el espectro de la molécula que faciliten su detección.

Para terminar, cabe preguntarse cómo afectaría la presencia de ^{3}He no superfluido en una gota de ^{4}He dopada y con un vórtice. Cálculos teóricos indican que se produciría un reajuste en la densidad del ^{4}He, al ocupar los átomos no superfluidos de ^{3}He la región interior del vórtice. No obstante, las primeras capas de solvatación de la molécula resultarían poco afectadas por ello; el complejo, aun sufriendo una ligera desestabilización, no se destruiría.

En resumen, la investigación físico-química de nanogotas de helio isotópicamente puras o mezcladas, con o sin impurezas atómicas o moleculares, ha experimentado un gran avance en los últimos años. De su estudio, que empezó como una simple curiosidad, un voluntarista "vamos a ver qué pasa, seguramente será interesante y probablemente sorprendente", ha nacido un campo multidisciplinar en el que confluyen la espectroscopía molecular, la síntesis química y la física de la materia condensada a muy bajas temperaturas. En constante evolución, ofrece ricas aportaciones a la investigación básica y aplicada: desde la utilización de moléculas "sonda" para estudiar las nanogotas, al uso de las nanogotas para sintetizar nuevas especies químicas, inaccesibles por otros medios.

Los autores

Manuel Barranco, Ricardo Mayol y **Martí Pi** son profesores del departamento de estructura y constituyentes de la materia de la facultad de física de la Universidad de Barcelona. **Jesús Navarro** investiga en el Instituto de Física Corpuscular de Valencia del CSIC. Colaboran desde hace años en el estudio teórico de la estructura y espectroscopía de gotas de helio, puntos cuánticos, agregados metálicos y otros sistemas nanoscópicos.

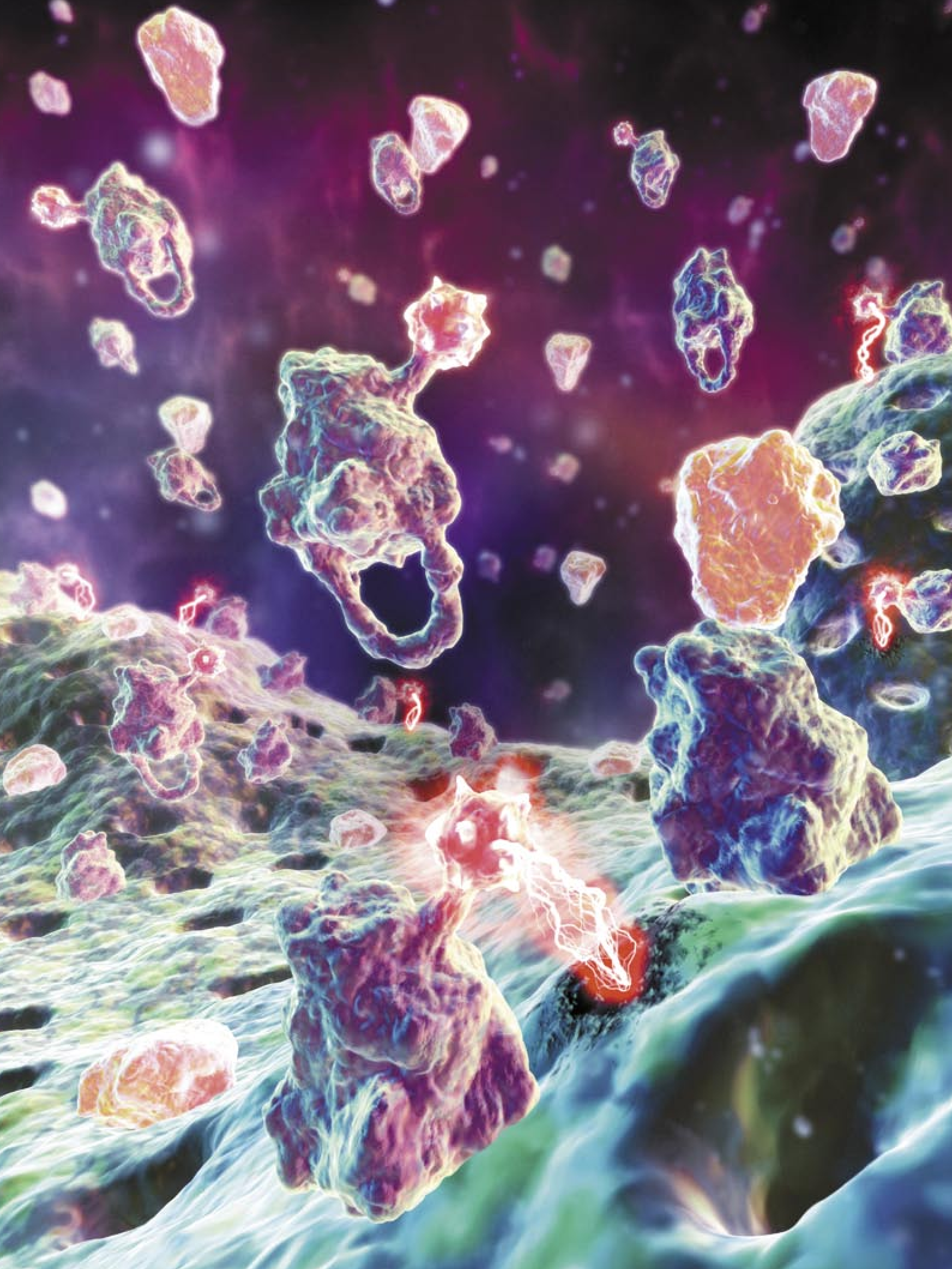
Bibliografía complementaria

QUANTIZED VORTICES IN MIXED ^{3}HE-^{4}HE DROPS. R. Mayol, M. Pi, M. Barranco y F. Dalfovo, en *Physical Review Letters*, vol. 87, pág. 145.301; 2001.

HELIUM NANODROPLETS. Diversos autores en el número especial de la revista *Journal of Chemical Physics*, vol. 115, págs. 10.065-10.281; 2001.

SUPERFLUID HELIUM DROPLETS: AN ULTRACOLD NANOLABORATORY. J. P. Toennies, A. F. Vilesov y K. B. Whaley, en *Physics Today*, pág. 31; febrero, 2001.

STABILITY OF SMALL MIXED CLUSTERS OF ^{4}HE AND ^{3}HE ATOMS. R. Guardiola y J. Navarro en *Physical Review Letters*, vol. 89, pág. 193.401; 2002.



Nanocuerpos

Pequeñas proteínas extraídas de camellos y llamas mejorarían la eficacia terapéutica de los anticuerpos

W. Wayt Gibbs

La historia de Ablynx empezó como la de muchas otras compañías biotecnológicas: surgió de la confluencia entre un descubrimiento casual, la oportunidad del momento y una ambición desmedida. Emplazada en dos pisos de un viejo y anodino laboratorio en un campus tecnológico de los aledaños de la ciudad universitaria de Gante, la empresa ha cumplido su tercer año y emplea a 45 personas, de las que 33 son científicos y bioingenieros. Un cuerpo directivo reducido y una misión clara: dar con la mínima porción de proteína que cumpla la misma función que un anticuerpo, para luego transformarla en un medicamento multimillonario o, mejor aún, en el primero de una clase de fármacos contra el cáncer, la artritis reumatoide, las inflamaciones intestinales y, por qué no, contra la enfermedad de Alzheimer.

Pese a contar con el respaldo de un capital-riesgo de 40 millones de dólares y con la colaboración con Genencor, Procter & Gamble y el Consejo Nacional de Investigación canadiense, Ablynx no lo tiene fácil. Su ambiciosa meta parecería del todo vana si no fuera por el reciente y brusco aumento de la demanda de terapias basadas en anticuerpos, los inconvenientes que presentan aún esos refinados medicamentos y los profundos conocimientos que los expertos de la compañía poseen sobre la peculiar biología de los camélidos.

Cerebro aparte, el componente más complicado de nuestro organismo es el sistema inmunitario. Vivimos en un entorno infestado de bacterias, lleno de una variedad casi infinita de gérmenes que nos toman como campos de desove. De esas arremetidas nos defienden los anticuerpos. Fabricados por las células B en una también impresionante variedad de modelos, estas enormes proteínas en forma de Y patrullan por la sangre y el fluido intercelular; con las ramas abiertas y valiéndose de una suerte de sentido químico del tacto, examinan a las moléculas que hallan a su paso. Cada modelo de anticuerpo reacciona frente a un antígeno particular, sea éste un microbio, un alérgeno o una toxina.

Sin embargo, pese a contar con unas defensas depuradas, enfermamos. No hay policía perfecta. El sistema inmunitario es en ocasiones demasiado lento o leve en su reacción; por ejemplo, ante un cáncer o una infección por virus sincitial respiratorio. Otras veces, en cambio, hipertrofia su respuesta; éste es el caso del rechazo de órganos trasplantados o de los ataques de asma. Cuando ataca por error a las células de su mismo organismo, la respuesta inmunitaria causa artritis reumatoide y otras enfermedades degenerativas.

Durante años, las firmas farmacéuticas trataron de obtener anticuerpos artificiales que corrigieran —o al menos moderaran— tales fallos inmunitarios. Pero en su mayoría los primeros intentos fracasaron y acabaron en un fiasco económico. En el curso de los veinte años subsiguientes a la invención, en 1975, de un método de obtención de grandes cantidades de anticuerpos idénticos, o "monoclonales", sólo dos de esos medicamentos fueron aprobados por la Dirección Federal de Fármacos y Alimentos de los EE.UU. (FDA, de "Food and Drug Administration").

El atasco se despejó por fin en 1997. A finales de 2004, la FDA había aprobado 17 anticuerpos terapéuticos, entre los que se incluían prometedores tratamientos para los trastornos ya citados [*véase* "Presente y futuro de los anticuerpos monoclonales", por Carol Ezzell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2001]. La industria farmacéutica se embolsó, en

1. NANOCUERPOS DE VARIOS TIPOS (*morado*) podrían emplearse para atacar una célula cancerosa (*verde azulado*). De éstos, algunos podrían diseñarse para que se unieran a receptores celulares, impidiendo que los factores de crecimiento tumoral (*naranja*) llegaran a ella; otros transportarían cargas radiactivas (*apéndices en forma de porra*) hacia dianas cancerosas.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

2004, 11.200 millones de dólares por la venta de esas medicinas.

El mercado de anticuerpos monoclonales (AcM) sigue creciendo. En la actualidad, docenas de AcM se hallan en fase de desarrollo o de ensayo clínico. Según Janice M. Reichert, del Centro para el Estudio del Desarrollo de Medicamentos de la Universidad de Tufts, 16 de ellos conseguirán los permisos de la FDA antes de tres años. Predice también que, en 2008, las ventas mundiales de AcM alcanzarán los 17.000 millones de dólares.

Con miras a obtener un pequeño trozo de la tarta, Ablynx se apresta para acometer sus primeras pruebas clínicas en 2006. Quizás algún día los nanocuerpos (sencillas proteínas de tamaño un décimo el de un anticuerpo y pocos nanómetros de longitud) se conviertan en medicamentos para la enfermedad de Alzheimer y otras fuera del alcance de los anticuerpos al uso. Pero el objetivo principal de la compañía es otro: obtener nanocuerpos que hagan lo mismo que algunos de los anticuerpos más vendidos, sólo que con mayor eficacia.

Inconvenientes de los anticuerpos

Si bien prometedores, los fármacos basados en anticuerpos monoclonales no están exentos de inconvenientes: a saber, resultan demasiado caros y su obtención entraña notables dificultades técnicas. Tratar un paciente asmático con el anticuerpo Xolair cuesta unos 11.000 dólares al año (sólo la medicación). Ocho dosis de Ramicade, para la artritis reumatoide, se van en torno a los 4600 dólares. El tratamiento anual con Herceptin, medicamento anticanceroso basado en anticuerpos, supera los 38.000 dólares.



2. LAS LLAMAS producen un tipo de anticuerpos, exclusivo de los camélidos, que se usa como materia prima en la obtención de nanocuerpos.

INA JOHANNA GECKE

El elevado precio de los AcM se debe, en gran parte, a su complejidad. A escala molecular, los anticuerpos son gigantes: cada uno corresponde a un agregado de dos cadenas proteínicas pesadas y dos cadenas ligeras intrincadamente replegadas entre sí y guarnecidas de complicadísimos azúcares. Para obtener un AcM con propiedades terapéuticas suele empezarse por aislar un anticuerpo extraído de ratones. Luego, la molécula se "humaniza" tanteando con los genes que la codifican para sustituir parte de la proteína, si no toda, por secuencias de aminoácidos copiadas de los anticuerpos humanos. (Otra posibilidad consiste en obtener, mediante ingeniería genética, ratones que produzcan directamente anticuerpos casi humanos.)

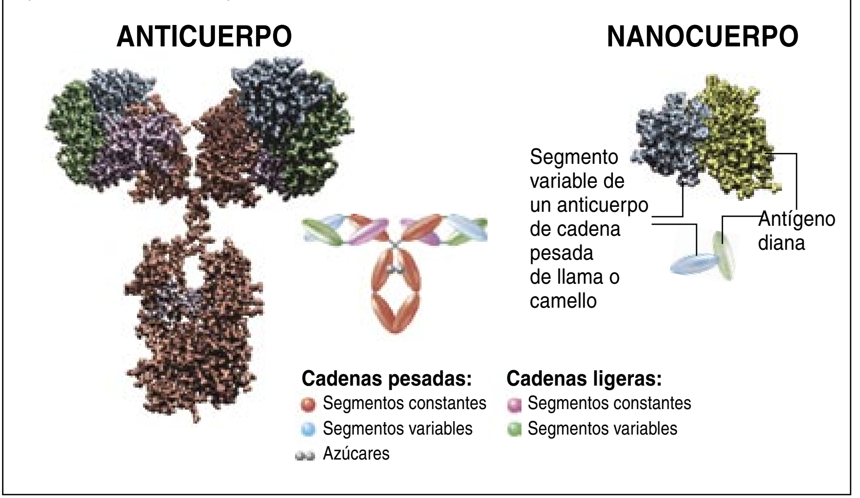
La humanización de los anticuerpos reduce los efectos secundarios que éstos provocan cuando el organismo del paciente los percibe como invasores foráneos y lanza un ataque inmunitario sobre los mismos. Pero el proceso de humanización requiere varios meses de trabajo altamente tecnificado. Además, las macromoléculas resultantes son tan complejas, que no es posible sintetizarlas a partir de compuestos químicos básicos, como se hace con los fármacos habituales. Deben cultivarse en tanques biorreactores de células de mamíferos previamente tratadas mediante ingeniería genética para que contengan los múltiples genes necesarios para obtener un solo anticuerpo.

La producción en masa de cultivos celulares de este tipo entraña notables dificultades técnicas. Los costes de construcción y explotación de las fábricas de AcM son muy superiores a los de las plantas de biosíntesis química o microbiana de tamaño comparable. Por ejemplo, debe evitarse que los tanques se infecten con virus que puedan estropear las valiosas células o contaminar los anticuerpos. Un estudio reciente estima que, en los próximos años, la demanda de anticuerpos monoclonales superará con creces la producción. Todo apunta, pues, a un alza de los precios de las terapias basadas en anticuerpos.

El gran tamaño de estas moléculas inmunitarias impone también limitaciones farmacológicas. Las temperaturas elevadas y los valores extremos de *p*H hacen que los AcM se desen-

ANATOMIA DE UN ANTICUERPO

Los millones de anticuerpos que circulan por nuestro cuerpo comparten una estructura básica: dos cadenas proteínicas largas (pesadas) enlazadas a dos cadenas de menor tamaño (ligeras). En el extremo de cada brazo se halla un par de segmentos variables, característicos de cada tipo de anticuerpo; determinan la diana a la que se une. Un nanocuerpo corresponde a la parte variable de un anticuerpo de camello que carece de cadenas ligeras; mide alrededor de la décima parte de un anticuerpo.



W. WAYT GIBBS Y LUCY READING-IKKANDA

marañen. Por lo general, mueren en cuestión de semanas, salvo que se conserven a temperaturas cercanas a la de congelación. Los anticuerpos son rápidamente digeridos en el intestino, les está impedido el acceso al cerebro y quedan atrapados en la periferia de los tumores sólidos. Todo ello les resta eficacia en el tratamiento de numerosas enfermedades. Se administran mediante inyección.

Si el problema de los AcM es el tamaño molecular, reducirlo podría mejorar su eficacia, facilitar la obtención, el manejo, la administración y, por tanto, abaratarlos. Esta idea precede en varios años la invención de los nanocuerpos. En el decenio de 1980, se empezó a experimentar con fragmentos de anticuerpo creados despojando a éstos del tronco de la Y, o del tronco y una rama, dejando sólo una rama a cargo de las funciones de la molécula.

Lo mismo que los AcM enteros, esos fragmentos de anticuerpo (Fac) operan mediante la unión a toxinas, patógenos o a señales celulares aberrantes; en opción alternativa, se acoplan a los receptores celulares. Pero, a diferencia de los anticuerpos, los Fac no pueden reclutar a otros componentes del sistema inmunitario (las células T asesinas, por ejemplo), pues carecen del tronco proteínico que se encarga de esa tarea.

Sin embargo, los Fac cuentan con una clara ventaja: los producen bacterias, levaduras y hongos, menos costosos que las células de ratón o hámster necesarias para la síntesis de anticuerpos. Además, los Fac se abren paso hasta el centro de los tumores; mediante manipulación por ingeniería molecular se consigue que remolquen, directamente, hasta el tejido enfermo cargas tóxicas: isótopos radiactivos o fármacos quimioterápicos.

Su punto débil es que tienden a descomponerse o a salir del torrente sanguíneo, por lo que su semivida suele reducirse a horas (los anticuerpos persisten en el organismo durante semanas). Puede que un desalojo rápido sea precisamente lo deseable para eliminar una toxina; para un gran número de tratamientos ello constituye, sin embargo, un contratiempo. Hasta la fecha, sólo un Fac terapéutico ha llegado al mercado en EE.UU.; y de ello hace ya más de un decenio.

Algunas firmas, entre ellas Domantis (Cambridge, Massachusetts), han recortado aún más los Fac: los despojan de todo salvo de la punta de una de las dos cadenas. Ese segmento, característico de cada modelo de anticuerpo, contiene las terminaciones químicas críticas o zonas determinantes de complementariedad (CDR, de "complementarity determining regions"), que definen el lugar de unión al antígeno; determinan qué diana reconoce cada anticuerpo y cuán estrechamente se unen ambos al encontrarse. Los anticuerpos de dominio resultantes (así ha bautizado Domantis a sus proteínas) son de tamaño similar a los nanocuerpos de Ablynx.

Sin embargo, al derivar de anticuerpos de doble cadena (moléculas de mayor longitud), las proteínas de dominio conservan un carácter hidrófobo que les lleva a unirse entre sí: se agregan en el interior de la bacteria que los fabrica, así como en el interior del paciente que los ingiere. Ello rebaja su rendimiento y dificulta su labor.

Del dromedario al medicamento

Mientras los expertos siguen rediseñando los fragmentos de anticuerpo para mejorar su eficacia, Ablynx aprovecha una alternativa brindada por la naturaleza. En 1989, Serge Muyldermans y Raymond Hamers, de la Universidad Libre de Bruselas, investigaban cómo los dromedarios (camellos de una joroba, variedad árabe) y los búfalos de agua rechazan a los parásitos. Observaron un extraño fenómeno: además de los anticuerpos normales de cuatro cadenas, la sangre de los dromedarios parecía contener también unos anticuerpos más simples, dotados de sólo un par de cadenas pesadas.

En 1993, tras varios años de trabajo, Hamers, Muyldermans y sus compañeros publicaron en *Nature* su hallazgo fortuito: en los dromedarios, así como en los camellos asiáticos de dos jorobas y las llamas sudamericanas, la mitad aproximada de los anticuerpos en sangre carecían de cadenas ligeras. Descubrieron también que esos anticuerpos "incompletos" se unían a su diana con la misma firmeza que los anticuerpos normales, pese a contar sólo con la mitad de CDR. A diferencia de los Fac, los anticuerpos de cadena pesada no muestran pegajosidad mutua.

Por qué algunos camélidos difieren de los demás mamíferos en este particular sigue siendo un misterio. Pero acaso la evolución nos haya brindado una vía alternativa para abordar algu-

ASI SE OBTIENEN ANTICUERPOS Y NANOCUERPOS

La obtención de un nanocuerpo requiere menos tiempo y dinero que la de un anticuerpo. En ambos casos, el sistema inmunitario de un animal lleva a cabo el "diseño" inicial de una proteína que se une a la molécula diana. Luego, en el laboratorio, se retoca el ADN que codifica esa proteína para añadirle las propiedades que se desean para el fármaco.

NANOCUERPOS MONOCLONALES TRADICIONALES

1 Inmunización

Antígeno

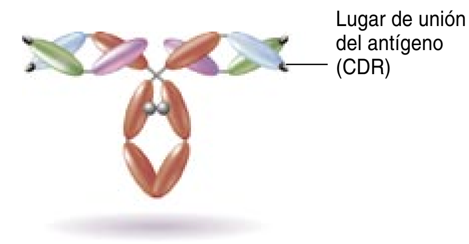
Se inyecta en un ratón la molécula diana. Las células B del sistema inmunitario del animal generan anticuerpos específicos de ese antígeno

2 Fusión, selección y desarrollo

La mezcla de células B (*azules*) con células cancerosas de mieloma (*anaranjadas*) produce hibridomas (*moradas*) que se dividen indefinidamente

Las hibridomas que fabrican el anticuerpo de interés se identifican y se cultivan

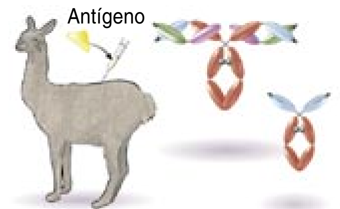
3 Cosecha de anticuerpos



El cultivo secreta réplicas del anticuerpo; se purifican y ensayan

NANOCUERPOS

1 Immunización



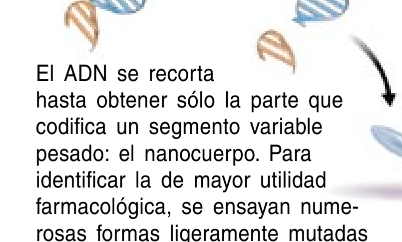
Se inmuniza un camello o una llama para que produzca anticuerpos normales (*izquierda*) y anticuerpos de cadena pesada (*derecha*) específicos de esa diana

2 Aislamiento y clonación



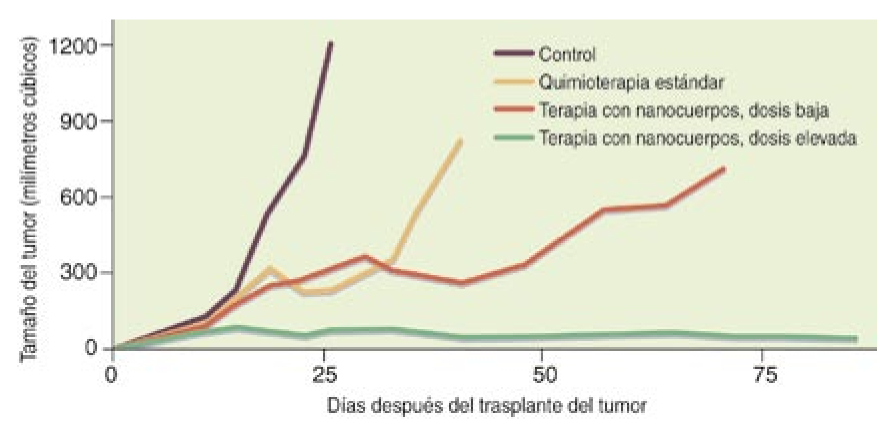
En una muestra de sangre, se identifican las células productoras de anticuerpos de cadena pesada de gran afinidad por la diana. Luego, se obtiene la secuencia de ADN para los genes que codifican el anticuerpo

3 Ingeniería genética



El ADN se recorta hasta obtener sólo la parte que codifica un segmento variable pesado: el nanocuerpo. Para identificar la de mayor utilidad farmacológica, se ensayan numerosas formas ligeramente mutadas del anticuerpo

nas de las más espinosas cuestiones sobre los anticuerpos y los Fac. Cuando el grupo de Muyldermans redujo aquellas moléculas a sus segmentos distintivos, éstos retuvieron una elevada afinidad por sus dianas, casi igual a la de un anticuerpo diez veces mayor. Esas proteínas acortadas mostraron también mayor agilidad química, pues eran capaces de unirse a dianas demasiado pequeñas para dar cabida a un anticuerpo, incluidos los sitios activos de las enzimas y las grietas de las membranas celulares. Habían nacido los nanocuerpos. Ablynx no tardó en constituirse.

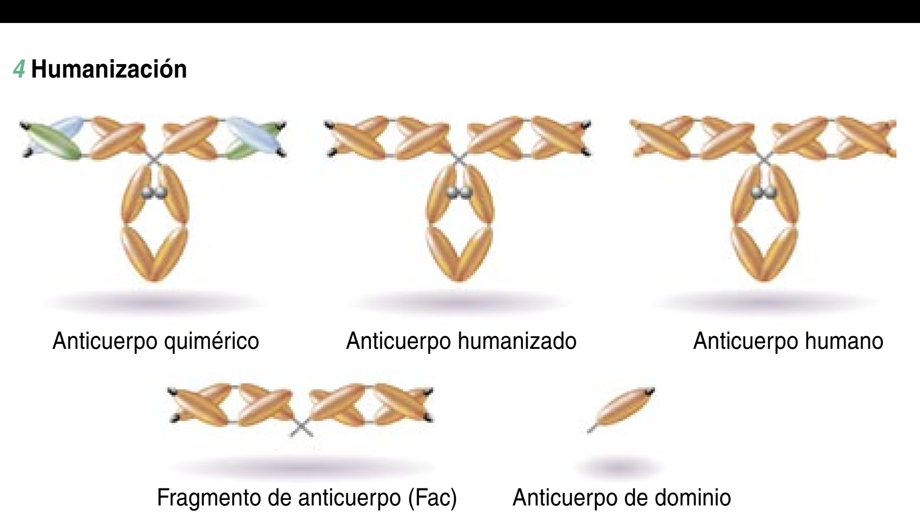


3. NANOCUERPOS ANTICANCEROSOS se ensayaron en ratones inyectados con células tumorales humanas. La quimioterapia estándar sólo retrasó el desarrollo del cáncer. Sin embargo, con dosis elevadas de quimioterapia dirigida por nanocuerpos los tumores remitieron.

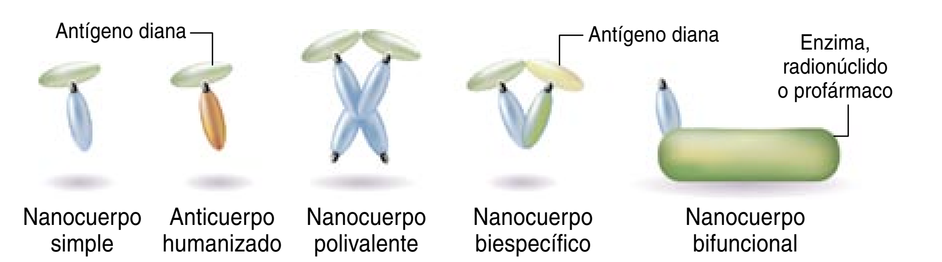
Dado que los nanocuerpos son mucho menores que los anticuerpos y, a diferencia de los anticuerpos de dominio, no son hidrófobos, muestran mayor resistencia al calor y a valores extremos de *p*H. Pieter Rottiers y Hilde Revets, del Instituto de Biotecnología de Flandes (VIB), han demostrado que estas pequeñas proteínas retienen su actividad cuando atraviesan el tracto intestinal del ratón. Ello plantea la posibilidad de utilizar píldoras de nanocuerpos para tratar la inflamación del intestino grueso, el cáncer de colon y otros trastornos.

En cuanto a la composición química y a la conformación, los nanocuerpos son más simples que los anticuerpos.

LUCY READING-IKKANDA



Se sustituyen segmentos de anticuerpo de ratón por segmentos humanos (*naranja*); el anticuerpo se secciona para obtener fragmentos de tamaños diversos



Con los genes del nanocuerpo se unen genes de otros nanocuerpos u otras biomoléculas para obtener fármacos que luego se producen en cultivos bacterianos, fúngicos o de levadura

Así, aquéllos se codifican en un gen y se sintetiza en los microorganismos. En 2002, biólogos del holandés Unilever Research prepararon más de un kilogramo de nanocuerpos a partir de 15.000 litros de levadura (un rendimiento de 67 miligramos por litro). Ablynx ha obtenido rendimientos superiores a un gramo por litro de cultivo de levadura: tasas de producción que sobrepasan con creces las de anticuerpos. Además, asegura que sus nanocuerpos son estables a temperatura ambiente y que se conservan sin refrigeración durante mucho tiempo.

La creación de nuevos tipos de nanocuerpos entraña menores dificultades técnicas —y por ello es más rápida y menos costosa— que la de anticuerpos. Inmunizando llamas con el antígeno diana y extrayendo luego de su sangre anticuerpos de cadena pesada, se pasa desde el antígeno a los nanocuerpos de alta afinidad en un plazo de cuatro meses. En algunos casos, como en la artritis reumatoide, el nanocuerpo sin más podría operar mediante la obstrucción de las señales celulares perjudiciales, bien uniéndose a la molécula emisora bien atascando los receptores de la superficie de las células.

Una de las mayores ventajas de los nanocuerpos es la relativa facilidad con que se unen entre sí o a otros tipos de compuestos. En Ablynx han acoplado nanocuerpos antialbuminarios a nanocuerpos de diana específica para prolongar hasta semanas su semivida en el torrente sanguíneo. Han enlazado hasta cuatro nanocuerpos para obtener entidades "polivalentes" capaces de absorber más antígeno por molécula o unirse a una entre dos dianas distintas, o a ambas.

En fecha reciente, Revets, Muyldermans y Patrick De Baetselier, del VIB, publicaron los resultados de un experimento en el que unos nanocuerpos diseñados por ellos se unían a un receptor de las células cancerosas, adhiriéndose así a todos los tumores que encontraban a su paso. Adaptaron un grupo de esos nanocuerpos para que fueran bifuncionales, conectando cada proteína a un enzima que convierte otra sustancia química inocua (un profármaco) en un agente quimioterapéutico tóxico que mata las células vecinas.

Los nanocuerpos se ensayaron en ratones, a los que se inyectaron células cancerosas humanas. Pronto desarrollaron tumores del tamaño de una canica. Revets trató algunos de los múridos sólo con quimioterapia: enfermaron, perdieron peso y sus tumores apenas menguaron (nada nuevo respecto a las quimioterapias al uso). A otro grupo de ratones se les administró una dosis elevada del nanocuerpo bifuncional con enzima adherida. Esperaron a que los nanocuerpos tuvieran tiempo de propagarse por el cuerpo; inyectaron entonces el profármaco. Los nanocuerpos enfocaron la quimioterapia hacia el cáncer: hicieron retroceder a los tumores sin alterar los tejidos sanos.

La eficacia de los nanocuerpos en humanos está todavía por comprobar. Deberán enfrentarse a un enemigo astuto: nuestro sistema inmunitario. En Albynx han ideado métodos de humanización de nanocuerpos. Estudios con babuinos han revelado que sus defensas no reaccionan ante la presencia de las minúsculas proteínas de origen camélido. Pero nada garantiza que éstas logren eludir la refinada red de vigilancia celular que protege a los humanos. Los ensayos clínicos determinarán si los nanocuerpos siguen avanzando en su carrera farmacológica o si comienzan a tropezar con las complejidades del sistema inmunitario humano.

Bibliografía complementaria

NEW DIRECTIONS IN MONOCLONAL ANTIBODIES. Mark C. Via. Cambridge Healthtech Advisors, octubre 2004.

NANOBODIES AS NOVEL AGENTS FOR CANCER THERAPY. Hilde Revets, Patrick de Baetselier y Serge Muyldermans en *Expert Opinion on Biological Therapy*, vol. 5, n.º 1, págs. 111–124; enero 2005.

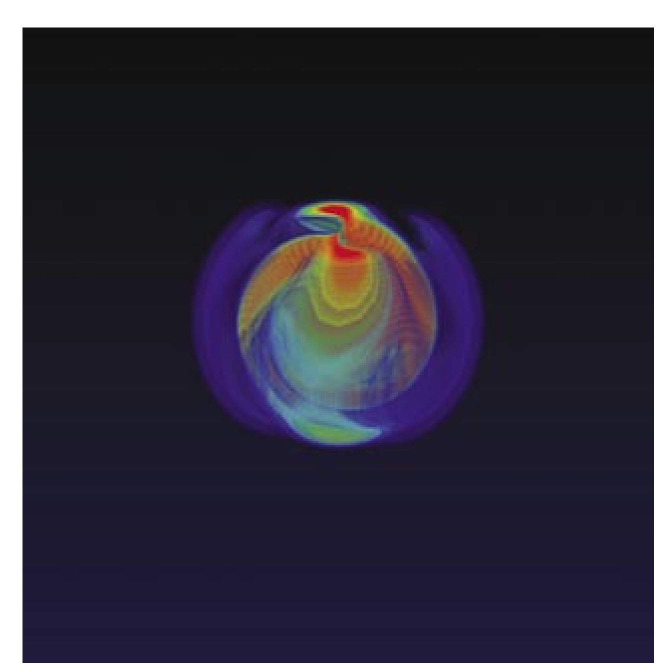
La detección de las ondas gravitatorias

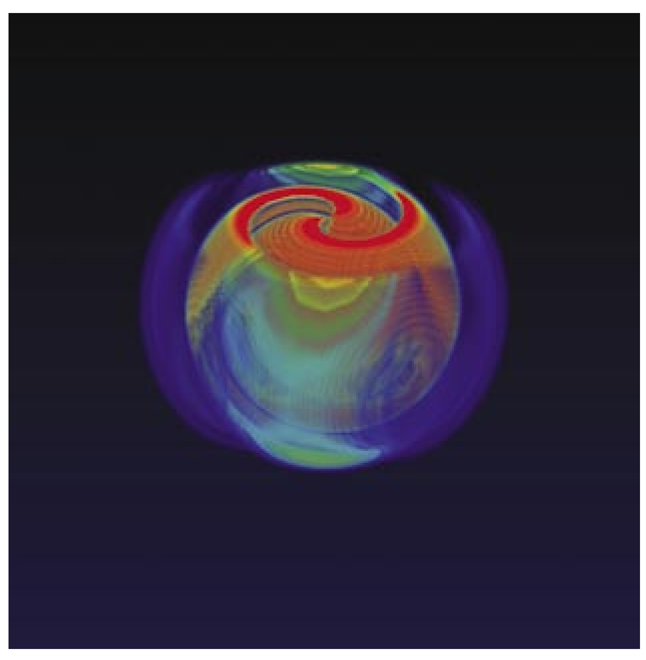
Una red global de detectores medirá pronto, quizá, las débiles ondas del propio espaciotiempo. Entonces, una nueva era de la investigación astrofísica habrá empezado

Peter S. Shawhan

En algún lugar, dos agujeros negros podrían estar chocando en este preciso momento. Sus potentes campos gravitatorios se entrelazarían en una espiral de muerte, que los arrastraría a fundirse en uno. Por ser agujeros negros, no emitirían delatadoras ráfagas de rayos X, ni tan siquiera un destello de luz, nada que pudiesen ver los potentes telescopios de hoy en día. Pero la energía liberada en este violento suceso se radiaría por el cosmos en forma de ondulaciones en la geometría del espacio y del tiempo.

Cada vez son más los investigadores que esperan detectar, por fin, los débiles ecos gravitatorios que, según se cree, llegan a la Tierra desde cataclismos astrofísicos como ése. Las señales serán tan pequeñas, que los aparatos que las detecten habrán de registrar cambios de longitud mucho menores que un núcleo atómico. Es técnicamente posible. Aunque deben superarse dificultades sustanciales para alcanzar las precisiones necesarias, los próximos años verán la aparición de una red global de instrumentos capaces de medir la radiación gravitacional que ahora se pierde sin haber sido observada.





1. LOS OBJETOS DE MASA GRANDE EN MOVIMIENTO crean ondas en el espaciotiempo, a las que se denomina ondas gravitatorias. Aunque la manifestación directa de tales ondas aún se ha de detectar, una simulación numérica, realizada por miembros del Proyecto Lazarus, muestra de qué modo se perturba la estructura del espaciotiempo, en el caso que se ve aquí por un par de

ELKE MUELLER; INSTITUTO DE FISICA GRAVITACIONAL MAX PLANCK (*simulación numérica*); W. BENGER, INSTITUTO ZUSE DE BERLIN E INST. DE FISICA GRAVITACIONAL MAX PLANCK (*visualización*)/*American Scientist*

Así se curva el espacio

A fin de entender el origen de la radiación gravitacional y qué tipo de aparato físico se necesita para detectarla, se requiere por lo menos un conocimiento rudimentario de la teoría general de la relatividad de Einstein. Esta teoría establece que el tiempo es una magnitud similar a las tres dimensiones del espacio y que la combinación de estas cuatro dimensiones en un "espaciotiempo" se puede describir con el lenguaje de la geometría.

La historia completa de la posición de un objeto en función del tiempo se representa con una "línea de universo", que atraviesa el sistema coordenado cuadridimensional desde el pasado hasta el presente y el futuro. Si sobre el objeto no actúa ninguna fuerza, se moverá con una velocidad constante y su línea de universo será una línea recta que formará un ángulo fijo respecto a los ejes de coordenadas.

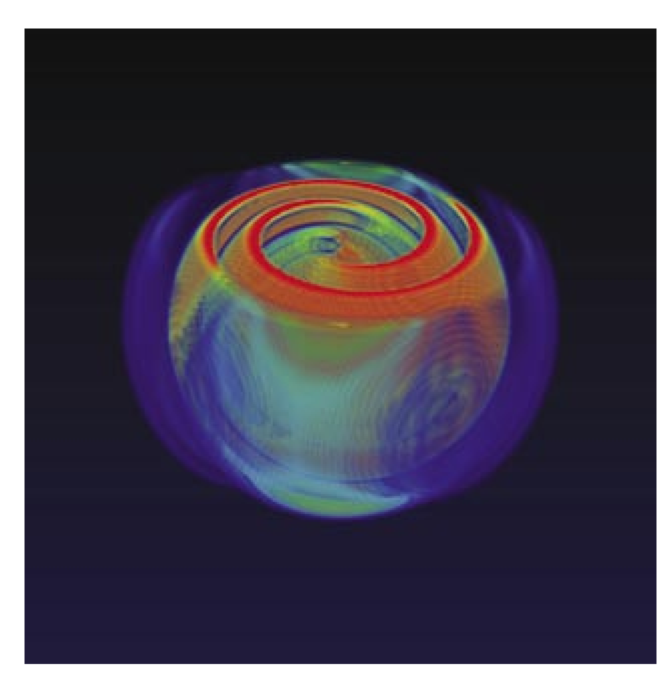
Un objeto experimenta cerca de una masa grande una aceleración debida a la fuerza de la gravedad, de manera que su línea de universo sigue una trayectoria curvada en relación al sistema de coordenadas. Por ejemplo, si se lanza al aire una bola desde el suelo verticalmente, la gráfica de su altura en función del tiempo describe una parábola. Por lo menos, éste es el punto de vista ordinario, que viene de la época de Newton. Einstein dio el enorme salto de abandonar esta manera de ver las cosas: propuso que un cuerpo masivo curva el propio sistema de coordenadas. En vez de seguir una trayectoria curvada en un sistema de coordenadas cartesiano, la bola realmente sigue una trayectoria "recta" (una *geodésica*) en un sistema de coordenadas curvado. Vuelve en un instante posterior a la mano de quien la ha lanzado porque la geodésica le lleva allí. La gravedad, por tanto, no es realmente una fuerza, sino una manifestación de la curvatura en la geometría del espaciotiempo.

La diferencia entre estos dos puntos de vista puede parecer un mero asunto de definición, pero la teoría de Einstein hace algunas predicciones específicas que se han verificado experimentalmente. Por ejemplo, el astrofísico británico Arthur Eddington aprovechó un eclipse solar de 1919 para medir la desviación de la luz de una estrella al pasar cerca del Sol. Su resultado coincidió con la predicción de la teoría. De esta concordancia se informó en las primeras páginas de los periódicos de todo el mundo. La reputación popular de Einstein quedó así establecida.

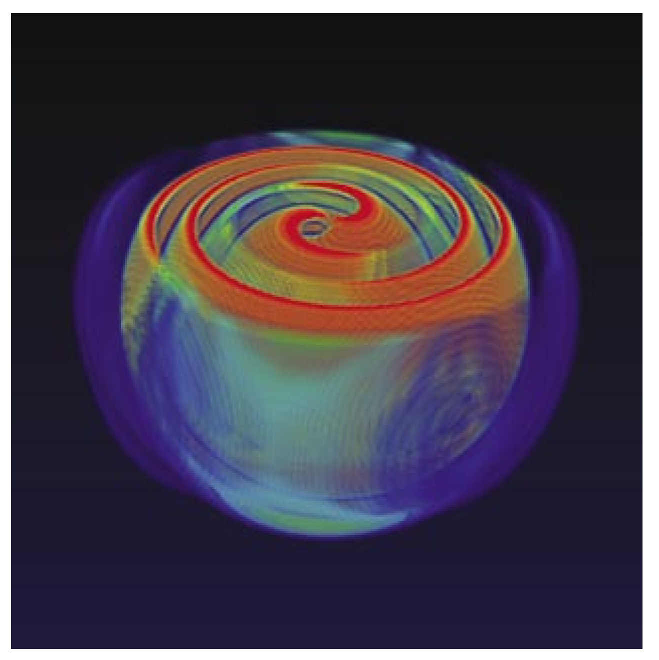
La relatividad general afirma que la curvatura geométrica inducida por un objeto masivo no surge instantáneamente en todas partes. Por el contrario, se propaga a partir de su fuente a la velocidad de la luz. De esta forma, si un objeto masivo altera su forma o su orientación, o si un conjunto de objetos cambia su disposición espacial, el efecto gravitacional —la curvatura del espaciotiempo— se propaga en forma de una *onda gravitatoria*.

Una onda gravitatoria se puede describir como una distorsión, variable con el tiempo, de la geometría del espacio: modifica la distancia efectiva entre cualquier par de puntos y esa modificación va cambiando con el tiempo. Si el cambio de masa que la causa es brusco, la onda tomará la forma de un corto pulso, muy parecido a la ola producida al lanzar una piedra en un estanque en reposo. En el caso de un cambio periódico, la onda se mantendrá, de manera parecida a la onda portadora de la señal de radio de una emisora. En cualquier caso, la amplitud de la onda será inversamente proporcional a la distancia a la fuente.

Al revés de lo que sucede con la aceleración gravitacional ordinaria, que siempre se dirige hacia la fuente, una onda gravitatoria actúa perpen-



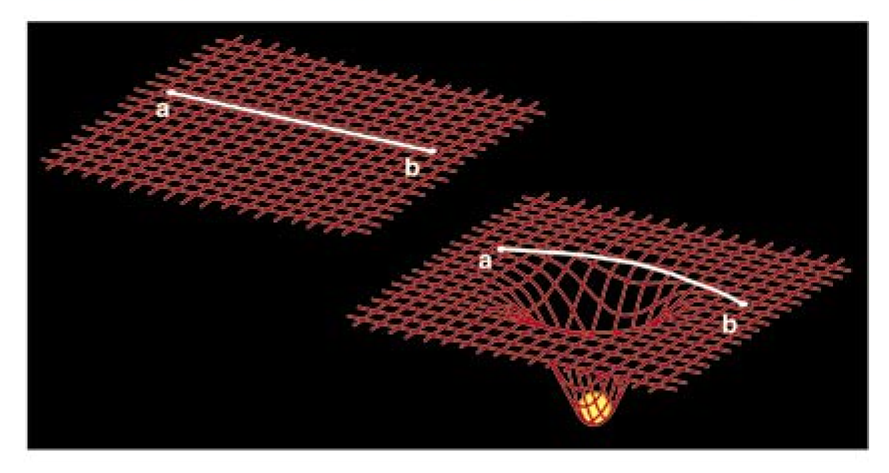
agujeros negros que orbitan uno alrededor del otro. La pérdida de energía en forma de radiación gravitatoria hace que sus órbitas vayan menguando poco a poco, hasta que acaban fundidas.

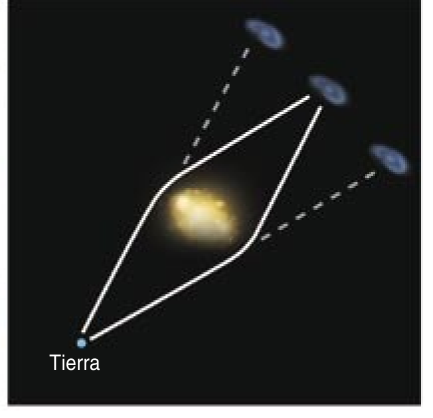


Estas imágenes, dispuestas de izquierda a derecha, muestran la propagación de la perturbación del espaciotiempo hacia el exterior como una onda espiral (*colores fuertes*).







2. DOS PUNTOS DEFINEN UNA LINEA RECTA. Esta característica de la geometría euclídea hace que sea sencillo determinar el camino más corto entre dos puntos de una ciudad, *a* y *b* (*arriba a la izquierda*). Con independencia de dónde estén *a* y *b*, la línea entre ellos siempre cortará la red de coordenadas (aquí las calles y avenidas) con el mismo ángulo. A escala global, la curvatura de la Tierra hace inaplicable la geometría euclídea y la determinación del camino más corto entre puntos distantes resulta mucho más complicada. El camino más corto, en general, no forma con la red de coordenadas (en este caso las líneas de longitud y latitud) un ángulo constante, tal como se puede ver fácilmente cuando se proyecta el recorrido que tomaría un avión entre Nueva York y Roma, que están más o menos a la misma latitud (*arriba a la derecha*). De manera parecida, un rayo de luz, que siempre sigue la trayectoria más corta entre puntos, viaja en línea recta cuando no hay masas, tal como se ve en esta imagen de un universo bidimensional, en la que se representa un conjunto de líneas reticulares (*en medio a la izquierda*). Cuando una masa curva este espaciotiempo de dos dimensiones, un rayo de luz que vaya de *a* a *b* seguirá una trayectoria curva que proporcione el camino más corto entre estos puntos (*en medio a la derecha*). Los astrónomos pueden a veces observar directamente tales curvaturas del espacio; es lo que sucede en esta imagen del telescopio espacial Hubble (*abajo a la izquierda*). El cúmulo central (*amarillento*) de galaxias tiene tanta masa, que curva la luz de una galaxia más lejana blanco-azulada, hasta el punto de que aparece en distintas partes del cielo (*abajo a la derecha*).

TOM DUNNE/*American Scientist*

dicularmente a la dirección en que se propaga; se dice por tanto que es una onda transversal. Coincide en eso con la luz y difiere del sonido, que se propaga por medio de ondas longitudinales.

En cualquier instante, una onda gravitatoria alarga el espacio en una dirección y lo contrae en la dirección perpendicular. La relatividad general predice dos posibles orientaciones para el alargamiento y la contracción, o dos "estados de polarización". Una fuente dada puede producir, bien uno de los estados, bien una combinación de los dos, dependiendo de los movimientos específicos de la materia en las direcciones transversales a la línea de visión.

Cualquier objeto que sea alcanzado por una onda gravitatoria se alarga y contrae junto con el espacio que ocupa. En ello se fundamenta el diseño de un detector. La clave es que la amplitud de una onda se describe en términos físicos mediante una *deformación*, esto es, un cambio en longitud por unidad de longitud. Así, los objetos grandes serán los más afectados, en el sentido de que será mayor la magnitud absoluta de su cambio de tamaño.

Producción de ondas

¿Qué tipo de sucesos genera ondas gravitatorias? Una respuesta corta: cuando mucha masa se desplaza rápidamente. La emisión de radiación gravitatoria, al ser un efecto relativista, requiere que grandes masas se muevan a velocidades comparables a la velocidad de la luz. Ningún aparato fabricado por el hombre puede producir ondas gravitatorias suficientemente grandes para que las mida ningún instrumento realizable. Las únicas fuentes posibles son los sistemas astrofísicos de gran masa y energía. Pero no todo sistema así genera ondas gravitatorias. A fin de crear el tipo de distorsión espacial que se propaga como una onda, la fuente debe tener una distribución asimétrica de materia que rápidamente cambie de forma o de orientación.

A fin de captar mejor estos principios, consideremos un sistema binario en el que dos objetos de masa elevada pero no muy grandes espacialmente (estrellas de neutrones o agujeros negros) orbitan uno alrededor del otro a poca distancia.

Un tal sistema emite ondas gravitatorias a una frecuencia doble que la frecuencia de rotación. ¿Por qué doble? Porque desde la perspectiva de un observador que lo mire de canto, el sistema estelar binario pasa, a un ritmo que duplica la frecuencia orbital, de verse pequeño (con los dos objetos alineados según la visual del observador) a parecer "alargado" (con las masas colocadas una al lado de la otra).

Las ondas gravitatorias resultantes se llevan energía y momento angular; la distancia orbital y el período decrecen, por consiguiente. La órbita contraída, a su vez, hace que la frecuencia de las ondas gravitatorias emitidas se intensifique, a la vez que aumenta su amplitud. El ritmo de disminución orbital se acelera hasta que los objetos finalmente colisionan. Los astrofísicos denominan a esta disminución y colisión una "inspiral".

Los sistemas binarios compactos han recibido mucha atención como fuentes de ondas gravitatorias, en parte debido a que la forma de la onda de sus emisiones puede modelarse con precisión, por lo menos en el caso de las estrellas de neutrones y de agujeros negros con masas que no excedan muchas veces la del Sol. Igualmente importante es que se sepa que existen unos cuantos de estos sistemas en nuestro entorno galáctico.

Russell Hulse y Joseph Taylor, los dos hoy en Princeton, ganaron un premio Nobel en 1993 por su descubrimiento y sus observaciones de uno de tales sistemas estelares binarios, PSR B1913+16. Lo componen dos estrellas de neutrones, una de las cuales es un *púlsar*, es decir, que emite pulsos de ondas de radio en nuestra dirección a intervalos sumamente regulares. Cada una de esas estrellas tiene una masa unas 1,4 veces la solar. El seguimiento cuidadoso del espaciado de los pulsos, realizado durante muchos años, ha determinado los parámetros orbitales completos del sistema con notable precisión. En particular, el período orbital, actualmente de unas 8 horas, decrece unos 77 microsegundos por año, lo que hará que estas dos estrellas se unan dentro de unos 300 millones de años.

Esta observación concuerda de manera exacta con las predicciones de la relatividad general acerca de la disminución orbital debida a la radiación gravitatoria del sistema. Desde entonces se han identificado algunos otros púlsares binarios que se fusionarán en algunos miles de millones de años o menos, incluido el espectacular descubrimiento, hace un año, de PSR J0737-3039A/B, un sistema púlsar doble único, que actualmente tiene un período orbital de 2,45 horas y que se fusionará dentro de 85 millones de años.

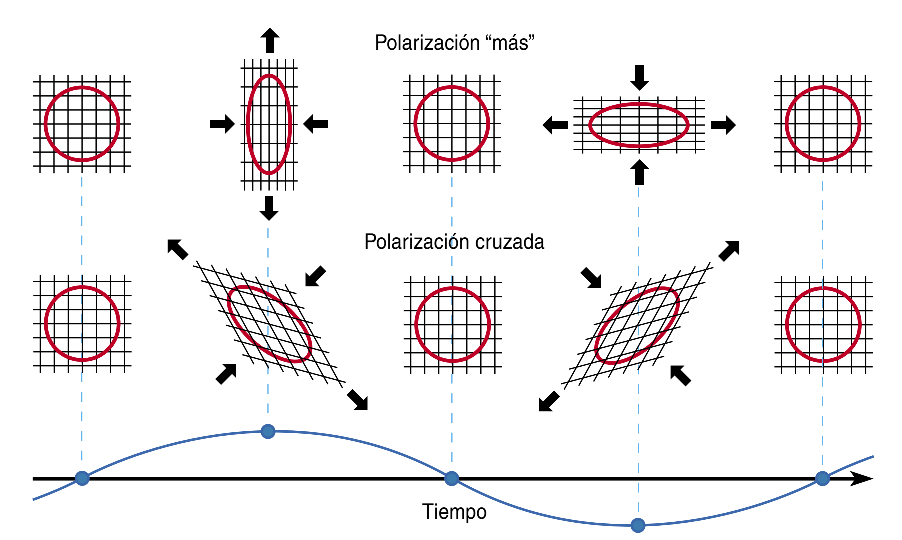
Dado el conocimiento de las órbitas menguantes de estos púlsares binarios, no cabe poner en cuestión la existencia de la radiación gravitacional. Sin embargo, hasta ahora han faltado observaciones *directas* de las ondas gravitatorias. Es fácil entender por qué: ninguno de los detectores construidos con ese objetivo tiene la suficiente precisión. Pero cuando finalmente se hagan tales medidas, ayudarán a encarar ciertas cuestiones que no pueden contestarse por ningún otro medio.

Resolución de enigmas cósmicos

Se espera que las futuras medidas de ondas gravitatorias ayudarán a determinar, por ejemplo, la abundancia de estrellas de neutrones binarias y de otros sistemas binarios compactos. Los radiotelescopios sólo pueden detectar tales sistemas si uno de los objetos es un púlsar. Esta limitación puede explicar por qué aún no se dispone de información observacional acerca de sistemas binarios que contengan un agujero negro o una estrella de neutrones, aunque tales sistemas deben de abundar. La astronomía de ondas gravitatorias tendría que detectar estas parejas, así como sistemas binarios que contengan dos agujeros negros, hallazgo que sería muy preciado también para la astronomía ordinaria.

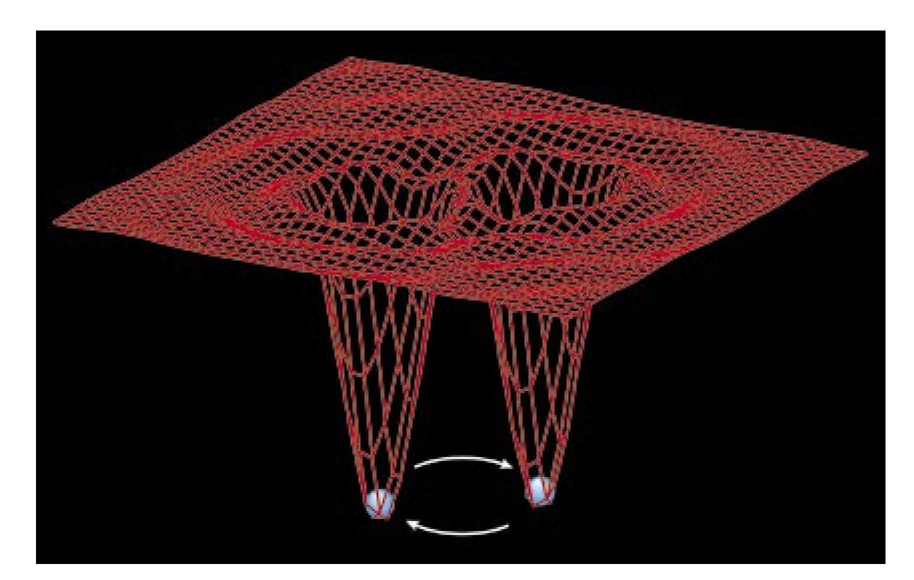
Las mediciones de ondas gravitatorias deberían también ayudar a determinar cómo es realmente el material de las estrellas de neutrones. Por ejemplo, si la corteza de las estrellas de neutrones es lo bastante rígida para mantener formas que no sean axialmente simétricas, esos objetos, al girar, emitirán ondas gravitatorias. Incluso aunque la corteza no sea tan rígida, las estrellas de neutrones que giran rápidamente, piensan algunos, deberán emitir ondas gravitatorias, ya que generan una inestabilidad que conduce a movimientos masivos del material estelar interno.

La observación de ondas gravitatorias permitirá cartografiar los movimientos de materia que provocan explosiones de supernovas. Estos cataclismos empiezan con el



3. LA RELATIVIDAD GENERAL predice que las ondas gravitatorias pueden adoptar dos patrones, o estados de polarización, básicos. La polarización "más" (*arriba*) distorsiona transitoriamente un objeto circular (o un conjunto de masas separadas dispuestas en un círculo) de manera que se comprima horizontalmente y se estire según la vertical, o viceversa, en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las direcciones de compresión y de estiramiento están giradas 45 grados en el caso de la polarización "cruzada" (*abajo*).

TOM DUNNE/*American Scientist*



4. DOS OBJETOS DE MASA CONSIDERABLE LIGADOS ENTRE SI en una órbita cerrada no sólo deforman el espaciotiempo en sus cercanías, sino que también forman ondas gravitatorias que se propagan hacia el exterior a la velocidad de la luz. El Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO) y otros detectores captarán tales ondulaciones, provenientes de fuentes distantes, si la perturbación gravitacional que crean es lo bastante grande.

colapso del núcleo de una estrella de gran masa, que libera una enorme cantidad de energía. Se sabe mucho de estas explosiones, pero se ignora aún cómo puede escapar esta energía a través de las densas capas de material estelar. Aunque las simulaciones numéricas sugieren que la convección y la rotación del núcleo desempeñan un papel crucial, modelar fiablemente estos movimientos sigue siendo un problema computacional inabordable. Sin embargo, está claro que durante la explosión se emitirán ondas gravitatorias si y sólo si la explosión es asimétrica. Las observaciones de ondas gravitatorias ofrecen así un medio de escrutar los mecanismos inductores de esas explosiones que complementará la astronomía corriente, capaz de descubrir el material despedido sólo algunas horas después de la explosión inicial.

Con mayor ambición aún, los cosmólogos esperan que las ondas gravitatorias les valgan para saber cómo se movía la masa en los primeros momentos tras la gran explosión (Big Bang). Las ondas gravitatorias emitidas en aquel instante siguen bañando la Tierra con pequeñas fluctuaciones geométricas, análogas a la radiación de fondo cósmica de microondas, pero originadas mucho antes en la evolución del universo, en una época en que el cosmos seguía siendo opaco a las ondas electromagnéticas.

La captación de ondas gravitatorias deberá también mostrar la masa y el espaciotiempo en situaciones extremas. Se espera que las ecuaciones no lineales de la relatividad general den lugar a comportamientos complejos en tales casos: cuando la radiación gravitacional afecte profundamente la evolución de los sistemas astrofísicos. Estas predicciones se podrán comprobar con las observaciones de binarias compactas de masa elevada (especialmente si uno o ambos objetos giran deprisa) y por las observaciones de ondas intensas emitidas cuando dos objetos de gran masa se unen.

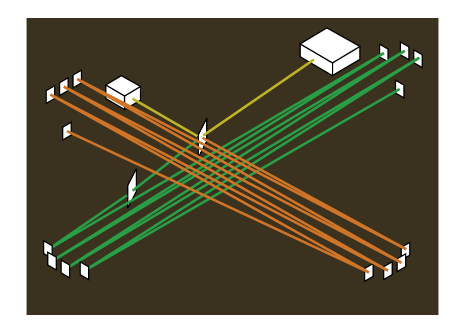
Finalmente, se espera que esta línea de investigación contribuya a determinar la verdadera naturaleza de la gravedad. La relatividad general, a pesar de su espectacular éxito en diversas comprobaciones experimentales, no es la única teoría posible de la gravedad. Están además las teorías "escalar-tensoriales"; en ellas, la naturaleza de la radiación gravitatoria difiere de la que le atribuye la relatividad general. En particular, estas teorías predicen más de dos estados de polarización. Observaciones simultáneas de una fuente de intensidad suficiente por medio de múltiples detectores contrastarían estas teorías.

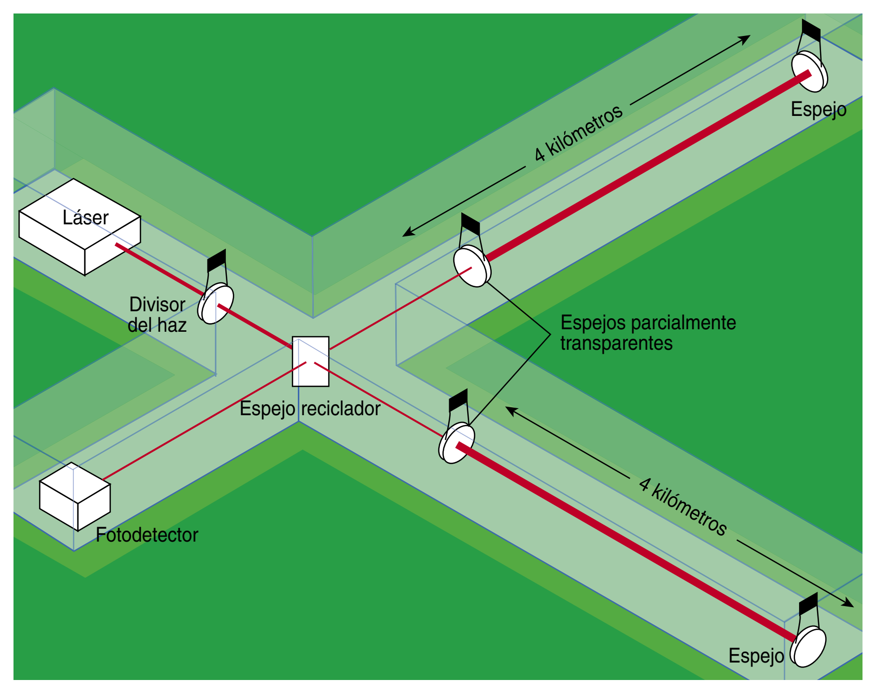
Aunque la recompensa científica promete ser enorme, la detección directa de ondas gravitatorias supone un problema experimental extraordinario. Se espera que las fuentes sean raras o de por sí débiles (o las dos cosas a la vez). En consecuencia, los instrumentos deben ser muy sensibles; han de analizar un gran volumen de espacio en un tiempo razonable. La amplitud de la deformación causada por una onda gravitatoria típica que alcance la Tierra sería de alrededor de 10^{-21}. Este número es tan pequeño, que cuesta imaginarlo. Significa que la distancia entre dos objetos separados, digamos, por el

Púlsar	Año de descubrimiento	Período orbital (horas)	Excentricidad	Tiempo hasta la unión (millones de años)
B1913+16	1974	7,75	0,617	300
B2127+11C	1990	8,05	0,681	220
B1534+12	1990	10,10	0,274	2700
J0737–3039A,B	2003	2,45	0,088	85

5. CUATRO SISTEMAS BINARIOS, cada uno con un par de estrellas de neutrones, han sometido a prueba las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein y confirmado la existencia de ondas gravitatorias. Como la radiación gravitacional emitida por estos sistemas se lleva energía, sus órbitas se contraen lentamente. Las dos estrellas de cada uno de estos sistemas acabarán fusionándose en una, tras un lapso que dependerá a la vez del período orbital (los períodos más largos suelen dar tiempos más largos hasta la unión) y de la excentricidad (las excentricidades grandes tienden a acortar los tiempos que tardan en unirse).

WWW. ASTRONOMYNOTES.COM, CORTESIA DE NICK STROBEL (*arriba*); TOM DUNNE (*abajo*)/*American Scientist*





6. EL INTERFEROMETRO original de Michelson doblaba varias veces la trayectoria de la luz en cada brazo de su dispositivo mediante una serie de espejos (*arriba*). Los interferómetros del LIGO utilizan una técnica más compleja, en la que cada brazo sólo emplea dos espejos para crear una cavidad óptica resonante donde los fotones van y vienen unas 50 veces, en promedio (*derecha*). Cada una de las dos instalaciones LIGO, una en el estado de Washington y la otra en el de Louisiana, contiene un interferómetro con brazos de 4 kilómetros de largo; el observatorio de Washington también alberga un segundo interferómetro, con brazos de 2 kilómetros.

TOM DUNNE/*American Scientist*

diámetro de la Tierra, se alargarían y contraerían sólo en una cantidad igual al tamaño de un núcleo atómico. Sería fácil concluir que la detección directa de ondas gravitatorias es imposible. Pero algunos físicos lo consideran un reto.

Cilindros e interferómetros

Joseph Weber, físico de la Universidad de Maryland, acometió en los años sesenta los primeros intentos serios de medir las ondas gravitatorias. El detector de Weber consistía en un gran cilindro de aluminio sólido colgado horizontalmente por su punto medio de un cable. En un extremo se instaló un transductor sensible, que medía las vibraciones del cilindro a su frecuencia de resonancia; las podría inducir el paso de una onda gravitatoria.

Weber construyó muchos detectores y aportó algunos indicios de que se habían excitado simultáneamente, pero nadie pudo nunca reproducir sus resultados. Sin embargo, el diseño de la "barra" de Weber se ha ido refinando con el paso de los años y hoy funcionan varios de tales detectores. Dos de ellos operan a una fracción de grado sobre el cero absoluto, lo que minimiza el ruido debido a los movimientos térmicos internos.

Los detectores de barra sólo son muy sensibles en una banda de frecuencias bastante estrecha (cerca de la frecuencia de resonancia de la barra); esta característica limita los tipos de fuentes que cabe esperar que se detecten con ellos. De ahí que en los últimos años los esfuerzos se hayan concentrado en la *interferometría*, el uso de luz para medir con precisión las distancias entre espejos muy distantes. Los interferómetros tienen la ventaja de ser sensibles a un intervalo de frecuencias comparativamente ancho.

Aunque las configuraciones ópticas difieren algo, todos estos interferómetros son variaciones del diseño básico que Albert A. Michelson utilizó, primero en 1881 y de nuevo seis años después con la ayuda de Edward Morley, en el famoso experimento de Michelson-Morley. Aquella prueba eliminó la existencia del "éter", el medio fantasmagórico que muchos físicos del siglo XIX pensaban que bañaba el firmamento para permitir el paso de las ondas luminosas a través del espacio.

En esquema, un interferómetro de ondas gravitatorias funciona como sigue: un espejo parcialmente reflectante divide la luz de un láser en dos haces, que se propagan por los brazos perpendiculares del dispositivo. Unos espejos suspendidos libremente en los extremos de estos brazos reflejan los dos haces de luz, devolviéndolos a un punto común del espejo que desdobló el haz. El resultado de esta separación de los haces depende de la fase relativa de las ondas de los dos haces cuando se recombinan, que a su vez dependerá de cuánto haya tenido que recorrer cada uno. Así, un interferómetro puede calibrar la diferencia de longitud entre los dos brazos con una precisión de una pequeña fracción de la longitud de onda de la luz empleada.

Una medición de este tipo se adecua perfectamente al carácter de los desplazamientos que induce una onda gravitatoria. La amplitud del desplazamiento en cada brazo depende de la dirección de llegada y de la polarización de la onda. Aunque un interferómetro no puede detectar ondas en ciertas direcciones y polarizaciones, responde apreciablemente en la mayoría de casos. En este sentido, un interferómetro de ondas gravitatorias no "mira" en una dirección particular. Más bien "escucha" el universo que lo rodea.

Los láseres, las ópticas, los fotodetectores y los sistemas de control de hoy permiten medidas mucho más estables y precisas que las de Michelson y Morley. Tras décadas de planificación y elaboración de prototipos, nos es dado ya poder construir interferómetros de gran escala capaces de detectar los tipos de señales que

7. LA SENSIBILIDAD DE LIGO está limitada por tres efectos diferentes. A bajas frecuencias, la vibración sísmica de los espejos suspendidos libremente limita las señales gravitatorias menores que se pueden detectar. A altas frecuencias, la vida media de los fotones en el interior de los brazos, combinada con un efecto cuántico, el “ruido de disparo”, determina el límite inferior. Entre ambos extremos, la agitación térmica en las suspensiones de los espejos establece el nivel de ruido que acota la región de sensibilidad.

cabe pensar que llegarán a la Tierra. En consecuencia, se han construido grandes interferómetros para la detección de ondas gravitatorias en Europa, Japón y los Estados Unidos.

De los planos a los haces

LIGO, el “Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser”, es el proyecto de Estados Unidos en este campo. La Fundación Nacional de las Ciencias ha aportado los 300 millones de dólares que ha costado su construcción. Se ha tardado más de diez años en acabarlo. Es, pues, un proyecto de los considerados “ciencia a gran escala”, como los aceleradores de partículas. El Laboratorio LIGO (gestionado conjuntamente por el Instituto de Tecnología de California y el Instituto de Tecnología de Massachusetts) tiene instalaciones en Hanford, un emplazamiento del Departamento de Energía, en el estado de Washington, y en Livingston, Louisiana [esta sede, aunque quedó fuera de servicio, soportó bien el huracán Katrina; en los días anteriores a que éste tocase tierra, el interferómetro captó sus efectos microsísmicos].

En ambas instalaciones, un complejo central de edificios está conectado a dos estrechos túneles que discurren a lo largo de 4 kilómetros en direcciones perpendiculares. Estas largas conducciones albergan los haces láser. El Observatorio de Hanford dispone de dos interferómetros independientes, uno con brazos de 4 kilómetros y el otro de 2 kilómetros, colocados uno al lado del otro. En conjunto, los tres interferómetros del LIGO proporcionan un potente sistema de congruencia: la señal de una onda gravitatoria debe aparecer en los dos detectores de Hanford al mismo tiempo y con la misma amplitud de desplazamiento (es decir, con un factor dos de diferencia en el cambio de longitud absoluto), y en el detector de Livingston, con el máximo tiempo de desplazamiento de la luz entre los dos lugares, 10 milisegundos, antes o después.

LIGO añade algunos refinamientos al diseño básico de Michelson. Hace que los fotones vayan y vengan por los brazos unas 50 veces (en promedio) antes de dirigirse hacia el separador del haz. El interferómetro de Michelson doblaba también la trayectoria de la luz en cada uno de sus brazos (ocho veces) con espejos múltiples que cambiaban ligeramente cada segmento. En LIGO la luz va y viene entre los dos espejos en la misma trayectoria y escapa finalmente por donde llegó a través de uno de los espejos reflectantes, que es parcialmente transparente.

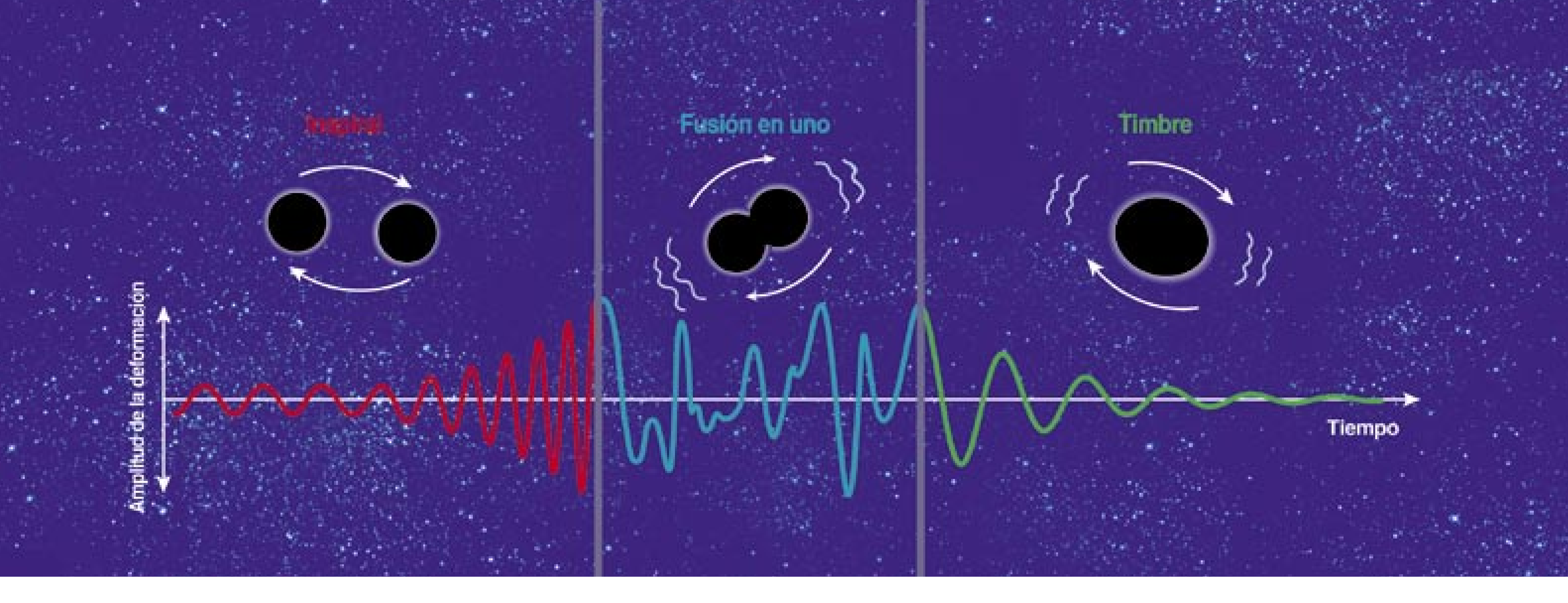
El funcionamiento adecuado exige que la distancia entre estos dos espejos esté controlada con una tolerancia del orden del nanómetro; se necesita tanta precisión porque los dos espejos han de constituir una cavidad óptica mantenida muy cerca de la resonancia: de manera que entre los espejos quepa un número grande y fijo de longitudes de onda de la luz. Se mide la diferencia entre las longitudes de los brazos (indicada por la intensidad del haz de luz recombinado que llega al fotodetector) y se utiliza esta información para ajustar unos electroimanes que apartan o atraen unos imanes permanentes pegados a los espejos. Así se preserva la cavidad.

Este sistema de retroalimentación está cuidadosamente diseñado para que aplique fuerzas a los espejos sólo a bajas frecuencias, en las que el movimiento del suelo (el ruido sísmico) y las resonancias mecánicas son peores. A frecuencias superiores, en las que el interferómetro se halla bien aislado de las perturbaciones externas, los espejos tienen libertad para responder a cualquier posible señal. De este modo, la diferencia entre las longitudes de los brazos constituye un indicador muy sensible de una onda gravitatoria a altas frecuencias. Incluso a frecuencias algo más bajas, donde el sistema de retroalimentación ejerce alguna influencia, resulta



8. UNA FOTOGRAFIA AEREA de la instalación LIGO en Livingston, Louisiana, revela la gran escala del aparato, con sus brazos de 4 kilómetros.

TOM DUNNE (*arriba*); LABORATORIO LIGO, INST. DE TECNOLOGIA DE CALIFORNIA, PASADENA; CORTESIA DE RUSTY GAUTREAUX, AERO-DATA (*abajo*)/*American Scientist*



9. LA PRUEBA DIRECTA DE LA RADIACION GRAVITATORIA puede llegar de una fuente intensa, como la unión de dos agujeros negros que orbiten uno alrededor del otro. Las señales de un suceso así se espera que muestren una oscilación de amplitud creciente y longitud de onda decreciente a medida que los agujeros negros describan una espiral que tienda a unirlos (*izquierda*). Cuando se junten, puede que se emita un patrón caótico de ondas gravitatorias (*centro*). Finalmente, se espera que el agujero negro único resultante "suene", que emita ondas con una o más frecuencias características que disminuirán con el tiempo (*derecha*).

TOM DUNNE/*American Scientist*

posible dar con ondas gravitatorias, precisamente porque causarían la retroalimentación.

Cada uno de los tres interferómetros del LIGO usa un láser de 10 watt, cuya emisión debe estar bien estabilizada. Aunque 10 watt no es mucho, otra mejora con respecto al diseño de Michelson amplifica la intensidad de la luz que se interfiere: un espejo parcialmente reflectante entre el láser y el desdoblador del haz. Así, la luz, en vez de volver del separador del haz hacia el láser, se "recicla" dentro del interferómetro. El resultado equivale a aumentar la potencia del láser por 30.

A fin de evitar los problemas que causa la dispersión de la luz, los distintos componentes ópticos están instalados en cámaras de vacío que, en conjunto, abarcan toda la longitud de los brazos. Se trata del mayor sistema de ultraalto vacío del mundo. Su construcción se encargó a Chicago Bridge and Iron Company. Fabricó las largas cámaras uniendo muchas secciones cilíndricas cortas, que a su vez se construyeron soldando láminas planas de delgado acero inoxidable dobladas en espiral; se parece a como suelen estar hechos los tubos de cartón.

Aunque el ensamblaje del sistema de vacío fue bastante complicado, costó más aislar los espejos del suelo y del entorno del laboratorio, que vibra a frecuencias inferiores a unos cuantos hertz. Una suspensión por cables, de las llamadas de "péndulo", que sujeta los espejos, proporciona la primera línea de defensa. Las bases sobre las que se apoyan los espejos suspendidos descansan en pesadas columnas con amortiguadores que protegen aún más los espejos de las vibraciones de alta frecuencia.

Gracias a todos estos ingenios, los interferómetros son muy sensibles a las ondas gravitatorias de una frecuencia de entre 40 hertz y 2 kilohertz. A frecuencias más bajas, los movimientos del suelo alimentan con una intensidad excesiva el sistema, a pesar de las suspensiones pendulares y los soportes que amortiguan las vibraciones. A frecuencias más elevadas, la naturaleza cuántica del haz láser (formado por fotones discretos, si bien muy numerosos) limita la precisión de la medida. Aunque el aumento de la potencia del láser reduciría el problema del ruido cuántico, los interferómetros del LIGO no sirven para medir ondas gravitatorias que estiren o contraigan los brazos mucho más deprisa que el tiempo que un fotón suele permanecer en sus cavidades ópticas, alrededor de un milisegundo.

Tamiz de bits

Las actividades científicas de este proyecto, incluido el análisis de los datos recogidos por los interferómetros, son responsabilidad de la Colaboración Científica LIGO, un grupo de más de 400 investigadores de docenas de instituciones de todo el mundo. Los datos obtenidos por LIGO constan de muchos "canales", cada uno de los cuales observa una parte distinta del aparato. Registran una serie continua de valores digitalizados. Un canal de cada interferómetro contiene la medición de la diferencia de longitud de los brazos, tomada con una frecuencia de 16.384 hertz; ahí es donde aparecería una onda gravitatoria. Centenares de canales auxiliares registran las señales de diagnóstico del interferómetro: señales de retroalimentación, así como datos de los sensores que registran distintas condiciones ambientales.

Mediante el análisis de los datos se pretende detectar débiles señales enterradas en ruidosos datos. Si se sabe la forma de la onda de la señal, como se sabe en el caso de la inspiral de un sistema binario de estrellas de neutrones o de la onda continua de una estrella de neutrones asimétrica en rotación, cabe emplear un sistema de *filtrado coincidente* para lograr una óptima precisión; es decir, podemos buscar correlaciones entre las medidas y el supuesto patrón de señales. Si se desconoce la forma exacta de la onda de la señal, nos debemos basar en técnicas más generales, como la búsqueda de pulsos cortos de una señal de intensidad anormalmente grande en alguna banda de frecuencia. Hay que poner mucho

cuidado: esperamos que el detector experimentará señales falsas como resultado de perturbaciones del entorno o de problemas instrumentales. De manera que deberemos utilizar los canales auxiliares para "vetar" las detecciones que en realidad tengan orígenes más prosaicos.

Existe un creciente espíritu de colaboración entre los investigadores del LIGO y quienes trabajan con los otros tres interferómetros de ondas gravitatorias: GEO600 (un proyecto británico-alemán que está poniendo a punto un instrumento de 600 metros cerca de Hannover), TAMA300 (un interferómetro de 300 metros que ha estado funcionando a temporadas durante los últimos años en Japón) y Virgo (un interferómetro franco-italiano de brazos de 3 kilómetros cercano a Pisa). La combinación de datos de múltiples interferómetros posibilitará la realización de más pruebas de congruencia y que se comprueben las características fundamentales de las ondas gravitatorias una vez que se haya establecido una señal. En un futuro no muy distante, la red global quizá cuente con otros grandes interferómetros, cuya construcción se sopesa en Japón, China y Australia.

La voz del universo

Los investigadores del LIGO realizaron su primera "toma de datos" durante 17 días del verano del año 2002. Hubo un par de sesiones más durante 2003, cada una de dos meses de duración, y una cuarta a finales de 2004. El tiempo entre las sesiones se dedicó a rastrear las fuentes de ruido y a realizar varios cambios para mejorar el funcionamiento. Como resultado, las sensibilidades de los interferómetros han mejorado continuamente y se han acercado mucho al objetivo.

Incluso una vez que los interferómetros del LIGO empiecen a funcionar con toda la sensibilidad, no hay garantías de que encuentren algo. No se puede saber cuándo hallarán ondas gravitatorias; al fin y al cabo, se trata de una exploración en lo aún desconocido. Sin embargo, podemos hacer suposiciones razonables acerca de algunas de las posibles fuentes. Por ejemplo, la proporción de inspirales de estrellas de neutrones binarias que tendrán lugar tan cerca como para proporcionar una señal detectable no llegará a una por decenio. Habríamos de tener suerte para que LIGO registrara pronto una inspiral. En el caso de otras fuentes, nos es más difícil calcular con qué frecuencia aparecerán. Nuestro objetivo para el próximo futuro es estar preparados para cualquier sorpresa que la naturaleza nos pueda ofrecer.

Las ondas gravitatorias no podrán seguir ocultas indefinidamente. Ya se están desarrollando mejores técnicas de detección para futuros interferómetros. Una de las mejoras propuestas, LIGO Avanzado, aprovechará esos desarrollos y aumentará las sensibilidades de los tres interferómetros en alrededor de un orden de magnitud; escrutará así un volumen de espacio mil veces mayor. Si se aprueba, tendríamos la seguridad de detectar inspirales binarias a un ritmo adecuado y sería mucho más probable identificar otras fuentes.

A modo de complemento de los detectores terrestres, pueden también rastrearse las ondas gravitatorias midiendo de manera continua y con precisión la distancia a una nave interplanetaria. En anteriores experimentos de este tipo, se emitía una señal de radio desde la Tierra y la nave lejana la devolvía. Actualmente, la Agencia Europea del Espacio y la NASA están colaborando en el diseño de la Antena Espacial para el Interferómetro Láser (LISA), un conjunto de tres naves espaciales que muy probablemente se pondrán en órbita en torno al Sol en la próxima década. Esta manera de abordar la astronomía de ondas gravitatorias se libra de los problemas del movimiento del suelo y dispondría de brazos interferométricos de millones de kilómetros de longitud: los haces láser que se propagarían a través del vacío espacial. LISA rastrearía una banda de frecuencias más baja que la que LIGO puede esperar cubrir; buscaría fuentes distintas. Y contará, al contrario que cualquiera de los actuales detectores terrestres, con sensibilidad suficiente para registrar ondas gravitatorias de fuentes conocidas (como el doble púlsar descubierto hace poco). Ofrecerá así valiosos patrones de calibración.

La dificultad de detectar de forma directa ondas gravitatorias es imponente. Pero tantos años de paciente trabajo nos han acercado a ese objetivo. Esperamos observar por fin estas pequeñas ondas del espaciotiempo en un futuro no muy lejano.

El autor

Peter S. Shawhan se doctoró en física en 1999 por la Universidad de Chicago. Hoy trabaja en el Instituto de Tecnología de California. Ha realizado diversas contribuciones al LIGO, donde ahora se dedica al análisis de datos.

Bibliografía complementaria

A NEW TEST OF GENERAL RELATIVITY: GRAVITATIONAL RADIATION AND THE BINARY PULSAR PSR 1913+16. J. H. Taylor y J. M. Weisberg en *Astrophysical Journal*, vol. 253, págs. 908-920; 1982.

WAS EINSTEIN RIGHT? PUTTING GENERAL RELATIVITY TO THE TEST. C. M. Will. Basic Books; Nueva York, 1993.

FUNDAMENTALS OF INTERFEROMETRIC GRAVITATIONAL WAVE DETECTORS. P. R. Saulson. World Scientific; Singapore, 1994.

LIGO AND THE DETECTION OF GRAVITATIONAL WAVES. B. C. Barish y R. Weiss en *Physics Today*, vol. 52, n.º 10, págs. 44-50; 1999.

GRAVITATIONAL RADIATION AND THE VALIDITY OF GENERAL RELATIVITY. C. M. Will en *Physics Today,* vol. 52, n.º 10, págs. 38-43; 1999.

GRAVITY FROM THE GROUND UP. B. S. Schutz. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

A DOUBLE-PULSAR SYSTEM: A RARE LABORATORY FOR RELATIVISTIC GRAVITY AND PLASMA PHYSICS. A. G. Lyne, M. Burgay, M. Kramer, A. Possenti, R. N. Manchester, F. Camilo, M. A. McLaughlin, D. R. Lorimer, N. D'Amico, B. C. Joshi, J. Reynolds y P. C. C. Freire en *Science*, vol. 303, págs. 1153-1157; 2004.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Tirones, deslices y violines



El vehículo se detiene con un chirriar de frenos... El detective aguza el oído... El sollozo de un violón suena desde el fondo de la casa apartada... La reja rechina cuando el detective la empuja... Estos sonidos, que alimentan la tensión en las películas de suspense y añaden emoción a las piezas musicales, comparten un mismo origen físico: la acción combinada del rozamiento y la elasticidad.

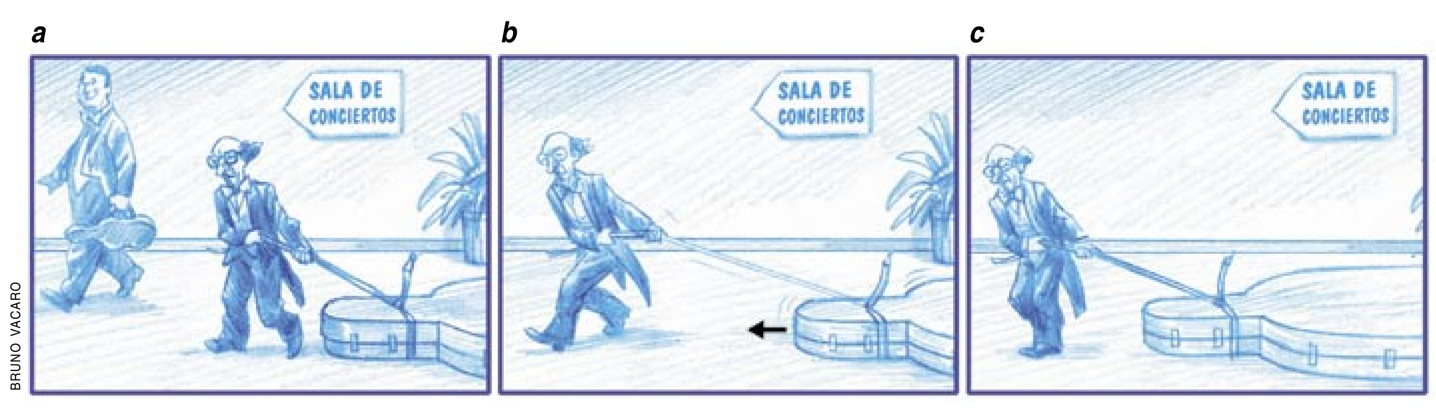
Los chirridos son producto del rozamiento que se produce entre dos superficies sólidas en contacto; la intensidad de esa fuerza de rozamiento disminuye conforme aumenta la velocidad relativa entre las superficies. Experimentamos este fenómeno cada vez que hacemos deslizar sobre el suelo una caja o un mueble. Para poner la caja en movimiento, debemos empujarla horizontalmente ejerciendo una fuerza igual o superior a un valor umbral: el producto del peso de la caja por el coeficiente de rozamiento estático, que vale entre 0,5 y 1. Iniciado el movimiento, la fuerza necesaria para mantenerlo es menor que la inicial, puesto que el rozamiento entre la caja y el suelo disminuye. Ello se debe a que el coeficiente de rozamiento dinámico es del orden de un 25 por ciento menor que el estático.

Añadamos ahora la elasticidad. Imaginemos que usamos una cuerda elástica, una goma, para tirar de la caja. Al principio, la cuerda no ejerce fuerza alguna sobre la caja. Poco a poco, empezamos a tirar de ella a velocidad constante. A medida que la goma se alarga, aumentan su tensión y la fuerza que ejerce sobre la caja. Pero la caja sigue inmóvil hasta que esa fuerza alcanza el valor umbral determinado por el coeficiente de rozamiento estático; entonces se pone en movimiento y el rozamiento (ahora dinámico) disminuye en un 25 por ciento. La goma empieza a contraerse para recuperar su longitud original, pero mientras su alargamiento no disminuya en un 25 por ciento, la fuerza que ésta ejerce sobre la caja sigue siendo mayor que la fuerza de rozamiento dinámico y, por tanto, la caja acelera. Luego la caja frena, pierde velocidad y, por fin, se para.

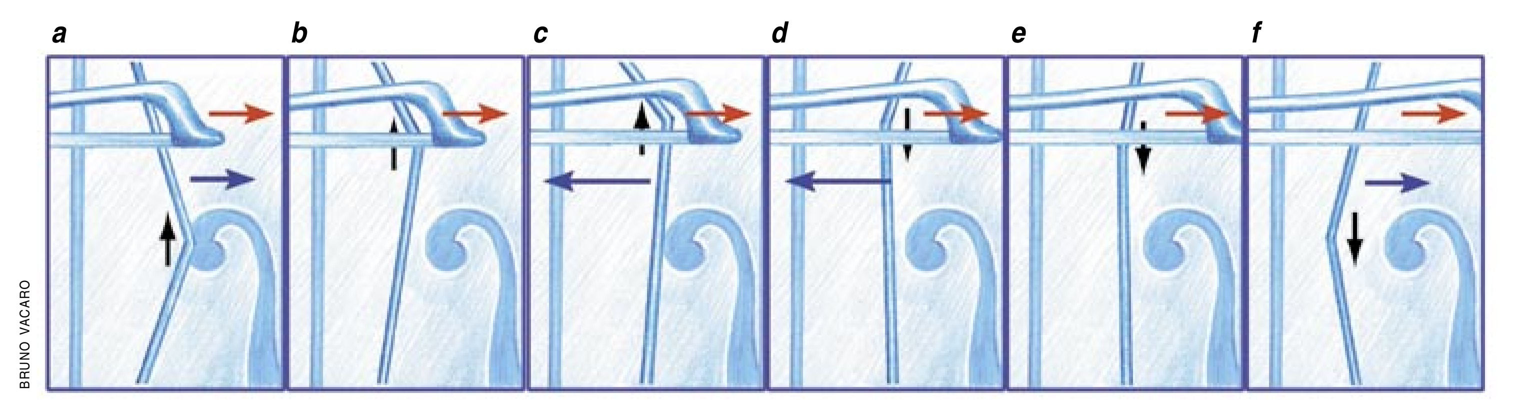
A tirones

Para volver a poner la caja en movimiento, puesto que el frotamiento torna a ser estático, hay que volver a estirar la cuerda elástica, y así sucesivamente. Se observa entonces un movimiento discontinuo, a tirones, que describe ciclos de retención-deslizamiento (“stick-slip”). Se produce una alternancia entre una fase estática, durante la cual la energía suministrada por el operador se almacena en forma elástica (aquí en la goma), y una fase de deslizamiento, en la que esa energía se libera bruscamente en forma de energía cinética y se disipa a través del calor en el rozamiento.

Las sacudidas características de este tipo de movimiento no siempre se perciben a simple vista; pero sí se oyen cuando su frecuencia crece lo suficiente: una puerta que chirría, unos frenos que rechinan, unos neu-



1. La caja permanece inmóvil mientras la fuerza de tracción es inferior al rozamiento estático (*a*). Cuando la caja se pone en movimiento, el rozamiento (ahora dinámico) disminuye (*b*). La caja se acelera, alcanza al caminante y luego se para (*c*). La cuerda elástica vuelve a su estado relajado y se inicia el ciclo de retención-deslizamiento.



2. Movimiento de retención-deslizamiento del arco sobre la cuerda de un violín. Durante la fase de "retención", el arco que se desplaza hacia la derecha (*flecha roja*) arrastra a la cuerda (*a*). La llegada de la deformación (*flecha negra*) hace que la cuerda se suelte y empiece a deslizarse sobre el arco (*b*), con independencia de cómo se mueva éste: es la fase de deslizamiento. La deformación se propaga hacia el puente (*c*), donde se refleja y retorna hacia el arco. La llegada de la deformación al arco hace que la cuerda vuelva a agarrarse a aquél (*e*). Mientras que el arco arrastra a la cuerda, la deformación se dirige hacia la ceja (*f*). Tras reflejarse en ésta, la deformación vuelve a dirigirse hacia el arco (*a*) y el ciclo se reinicia. Las flechas azules indican el movimiento global de la cuerda.

máticos que chillan o un dedo mojado que hace vibrar una copa. La elasticidad está siempre presente, si bien a veces enmascarada: así, cuando abrimos una puerta, la lámina metálica que une el marco de la misma con las bisagras y, por tanto, a la pared, se curva y opera como un muelle mientras el rozamiento impide que las dos partes de la bisagra deslicen una respecto a la otra. Cuando la fuerza ejercida es suficiente, empieza ese deslizamiento relativo, la lámina recupera su forma inicial y se reinicia el ciclo.

¿Cómo eliminar los chirridos? Volvamos al modelo de la caja. Para evitar la repetición de los ciclos de retención-deslizamiento, es preciso que la tracción que sufre la cuerda elástica no disminuya demasiado cuando la caja se pone en movimiento, es decir, que la velocidad de ésta no sea mucho mayor que la velocidad con la que tiramos de la goma. Una solución consiste en disminuir la energía elástica almacenada y tirar de la caja mediante una barra casi rígida. Otra posibilidad sería tirar rápidamente. Esta es la opción que ponemos en práctica —mientras esperamos a engrasar los goznes— cuando no queremos que una puerta chirríe: la abrimos de golpe.

Chirridos armoniosos

En vez de eliminar los chirridos, podemos también embellecerlos. Basta con asociar el movimiento de retención-deslizamiento a un sistema que presente de forma natural un movimiento periódico: una cuerda de violín, por ejemplo. En efecto, cuando una pequeña deformación transversal se propaga a lo largo de la cuerda, se refleja en cada uno de sus extremos: cualquiera que sea la forma de la deformación, provoca un movimiento de ida y vuelta de período igual al doble de la longitud de la cuerda dividida por la velocidad de propagación.

¿Qué ocurre cuando se frota un arco sobre una cuerda vibrante? Las cerdas del arco, impregnadas de colofonia, aumentan el coeficiente de rozamiento estático y el arco "muerde" la cuerda. Al comienzo de su movimiento, cuando se ataca la nota, el arco arrastra la cuerda. Esta forma un codo y, lo mismo que la cuerda de un arco para disparar flechas, ejerce una fuerza cada vez mayor sobre las cerdas. Cuando esa fuerza rebasa un cierto valor límite, la cuerda "se suelta" y empieza a deslizarse en sentido opuesto al movimiento del arco. La deformación creada se propaga a lo largo de la cuerda hasta el puente, se refleja en éste y regresa a la altura del arco. Este primer paso da a la cuerda una pequeña sacudida que la "reengancha" al arco y éste vuelve a arrastrarla. Durante ese tiempo, el codo sigue su camino, se refleja en la ceja o en el dedo del músico, regresa a la altura del arco y desengancha la cuerda, que vuelve a deslizarse y así sucesivamente.

Así pues, salvo en el momento de atacar una nota, no es la elasticidad lo que provoca el deslizamiento y la retención de la cuerda, sino la llegada periódica de una deformación. ¡El movimiento de retención-deslizamiento ya no es espontáneo, sino controlado! El timbre del sonido lo fija el período del movimiento, que depende de la longitud de la cuerda (eventualmente modificada por la posición del dedo) y de su tensión (que determina la velocidad de propagación de la deformación).

El ejecutante, deseoso de producir un sonido bello, se asegura de que la retención y el deslizamiento no se produzcan espontáneamente, sino sólo al paso de la deformación. Cuida así de mantener una presión, suficiente para que el arco no se deslice de forma descontrolada, pero no excesiva, y así evitar que la sacudida provocada por el paso del codo suelte la cuerda. Cuando el codo llega, la posición y la velocidad del arco no tienen efecto alguno sobre el timbre del sonido. En cambio, dado que esta última determina la velocidad de arrastre de la cuerda durante las fases de "retención", condiciona la amplitud de la deformación y, por tanto, el volumen del sonido: cuanto más rápido mueve el músico el arco, más intenso es el sonido.

Un principiante que controle mal la presión del arco lo apoyará demasiado o demasiado poco, no dejará que la cuerda cante y producirá un sonido desagradable. El conocimiento de las leyes físicas no constituye desde luego sinónimo de virtuosismo, pero si tocamos mal, sepamos al menos por qué…

Juan M.R. Parrondo

Hagan sus apuestas

Como se supone que soy un experto en juegos de azar, mucha gente me pregunta si no he aprovechado tanta sabiduría para hacerme rico en un casino. Lo cierto es que la única vez que he jugado a la ruleta fue hace muchos años, fascinado por un método de apuestas supuestamente infalible pero con el que perdí casi todos mis ahorros en menos de un cuarto de hora.

Existe un método clásico, probablemente conocido por muchos lectores, con el que, en teoría, siempre se puede ganar en la ruleta. Casanova lo describe en sus memorias, publicadas en 1754. Se apuesta siempre a rojo, a negro o a cualquier jugada que dé como premio la misma cantidad que se apuesta. Se comienza con una apuesta baja, un euro, por ejemplo. Cada vez que se pierde, se dobla la cantidad apostada, mientras que si se gana se vuelve a empezar el proceso con un euro. Si, por ejemplo, perdemos cinco veces seguidas, las apuestas que debemos realizar son 1, 2, 4, 8 y 16 euros en cada turno, lo que hace un total de 31 euros perdidos. En el sexto turno apostaremos 32 euros y por tanto, si ganamos, recuperamos todo lo perdido más un euro. Ocurre lo mismo con cualquier número de turnos, debido a una conocida fórmula matemática:

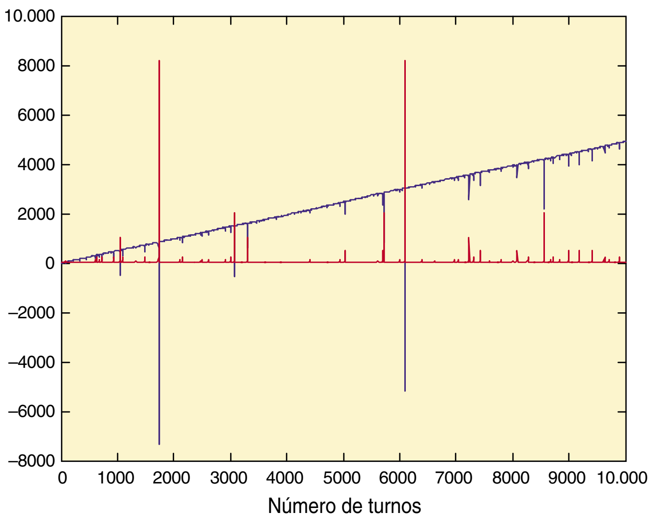
$$1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \ldots 2^n = 2^{n+1} - 1$$

Con este sistema basta ganar una vez para ganar un euro, sin importar cuántas veces hayamos perdido antes de ese turno ganador. Como es imposible perder un número infinito de veces, con el sistema de Casanova, que se conoce como *martingala*, se ganaría siempre. ¿Por qué entonces no se ha arruinado todavía ningún casino? La respuesta es muy simple: porque es bastante probable perder un gran número de veces seguidas y en ese caso la apuesta puede superar la apuesta máxima permitida o, lo que es peor, nuestros propios fondos.

En un conocido casino de Madrid, la apuesta máxima está entre 20 y 30 veces la apuesta mínima, con lo que la martingala alcanzaría la apuesta máxima con sólo perder cinco veces seguidas y esto ocurre con una probabilidad $(19/37)^5 = 0{,}03507$ (hay 37 números en la ruleta, de los que, si apostamos a rojo o a negro, 19 son perdedores dado que el cero es siempre perdedor).

Incluso con apuestas máximas más altas, la martingala entraña un considerable riesgo. En la figura 1 pueden ver la evolución del capital (*en azul*) y de la cantidad apostada (*en rojo*) de un jugador que aplica el método de martingala durante diez mil turnos, comenzando con un euro. Como vemos, el jugador gana de forma sistemática. Como gana un euro por cada turno ganador, la ganancia total es, aproximadamente, igual a la mitad del número de turnos. En la gráfica se aprecia que el capital se encuentra cerca de una recta de pendiente 1/2. Sin embargo, hay ciertos períodos de mala suerte en donde un número continuado de pérdidas hace que el capital baje considerablemente. Vemos una de estas malas rachas entre el turno 1000 y 2000, en donde la apuesta sube hasta 8192 (*curva roja*), después de 12 turnos sin ganar, y el capital desciende hasta casi –8000 euros. Es decir, nuestro jugador habría necesitado un “colchón” de unos 8000 euros para superar esta mala racha. Lo malo del método de martingala es que estas malas rachas pueden ser de cualquier intensidad. En la gráfica vemos que ha habido dos apuestas de 8192 euros, que es la cantidad a apostar después de 12 turnos sin ganar. Pero bien podría haber sido también perdedor el turno decimotercero, con lo que la apuesta habría subido a más de 16.000 euros. En definitiva, la martingala es un método muy arriesgado. De hecho, algunos casinos han aumentado considerablemente las apuestas máximas ante la evidencia de que nadie se atreve a poner en práctica la martingala, al menos en su formulación original. En algunos casinos de Las Vegas, la apuesta máxima puede llegar a ser 4000 veces la apuesta mínima. En ellos la martingala alcanzaría la apuesta máxima tras perder 11 veces seguidas. Podría parecer que el casino está arriesgándose excesivamente. Sin embargo, para que un jugador gane, por ejemplo, 1000 euros, necesitaría jugar aproximadamente 2000 veces y en esas dos mil veces la probabilidad de perder 11 veces seguidas es superior al 50 %.

En algunos libros y sitios de Internet se aconseja esperar a que, por ejemplo, salga rojo 5 veces seguidas para comenzar a utilizar la martingala apostando a negro, con la supersticiosa creencia de que es prácticamente imposible que en una tarde el rojo salga 15 veces



1. Capital (*en azul*) y apuesta realizada (*en rojo*) en 10.000 turnos utilizando el método de la martingala.

seguidas. Cualquier experto en probabilidad sabe que una ruleta no tiene (o no debe tener) memoria alguna. Aunque haya salido rojo 100 veces seguidas, la probabilidad de que salga rojo o negro en la siguiente tirada es exactamente la misma.

Hay otros métodos inspirados en la martingala pero, en apariencia, más razonables. Uno de ellos es el que consiguió engatusarme hace años, hasta que la caprichosa bolita de la ruleta me devolvió a la dura realidad. Se conoce como método de Labouchere, en honor de Henry du Pre Labouchere, un periodista y parlamentario inglés que vivió entre 1831 y 1912. Sin embargo, el propio Labouchere atribuía el método al matemático francés Condorcet (1743-1794), de quien ya hemos hablado en esta sección (*Paradojas democráticas*, marzo de 2002). El método consiste en escribir en un papel una lista con unos pocos números, por ejemplo, 1 1 3. En cada turno apostamos a rojo o negro la suma del primero y el último número de la lista. En nuestro caso, la primera apuesta sería de 4 euros. Cada vez que ganamos, tachamos el primero y el último número, mientras que, si perdemos, añadimos a la lista la cantidad perdida. Cuando se han tachado todos los números de la lista se vuelve a empezar. La siguiente tabla muestra cómo evoluciona el capital (empezando con cero euros), la apuesta y la lista en unos cuantos turnos:

LISTA	APUESTA	RESULTADO	CAPITAL
1 1 3	4	P	–4
1 1 3 4	5	P	–9
1 1 3 4 5	6	G	–3
1 3 4	5	P	–8
1 3 4 5	6	G	–2
3 4	7	P	–9
3 4 7	10	P	–19
3 4 7 10	13	G	–6
4 7	11	G	+5

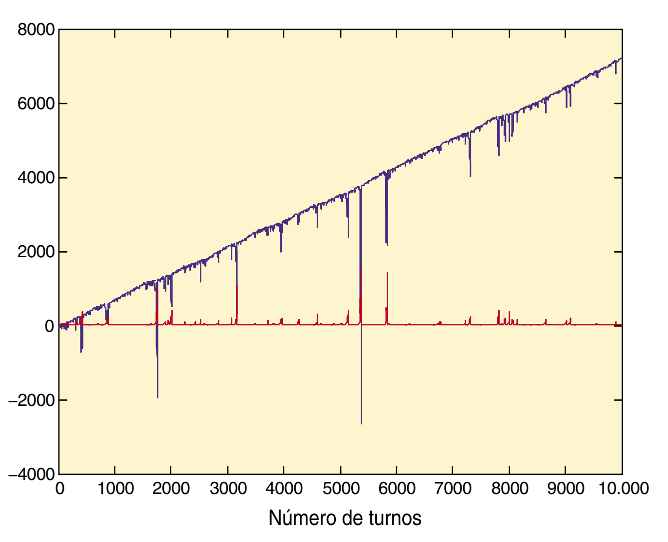
Después de estos 9 turnos, hemos tachado todos los números de la lista. Puesto que todo lo que se gana se tacha de la lista y todo lo que se pierde se apunta, la ganancia neta al tachar todos los números es igual a la suma de los números con los que comenzamos la lista, es decir, 1 + 1 + 3 = 5 euros. Pero cada vez que ganamos tachamos dos números (salvo si en la lista sólo queda un número) mientras que apuntamos sólo uno cada vez que perdemos. Por lo tanto, si perdemos n veces, bastará ganar $(n + 3)/2$ veces (o el entero inmediatamente superior si n es par) para tachar todos los números y ganar 5 euros. En el ejemplo de la tabla hemos perdido 5 veces y hemos ganado 4. Esta diferencia se hace mayor cuantos más turnos juguemos antes de tachar todos los números. Si, por ejemplo, perdemos 20 veces, basta ganar 12 para conseguir los 5 euros. El método de Labouchere se basa en la misma idea que la martingala: aumentar la apuesta cuando se pierde para, de ese modo, tener que ganar menos veces para recuperar lo perdido. La ventaja frente a la martingala es que la apuesta crece mucho más lentamente, con lo cual parece difícil alcanzar la apuesta máxima del casino.

Sin embargo, esta apreciación no se corresponde con la verdad. En la figura 2 se muestra una simulación del método y vemos que en ocasiones la apuesta (*curva roja*) casi alcanza los 2000 euros y que el capital desciende hasta casi –3000. El método de Labouchere es especialmente peligroso ante rachas en las que se pierden cuatro o cinco turnos seguidos y a continuación se gana sólo una vez. En ese caso, la lista se va poblando de números cada vez más altos.

En la figura 2 vemos que la ganancia media en 10.000 turnos es del orden de 7000 euros. Calcular la ganancia media de forma exacta es un problema matemático bastante difícil. Sin embargo, se puede estimar de una forma muy sencilla. Como hemos visto antes, con el método de Labouchere, si se pierde durante n turnos, basta ganar durante los $(n + 3)/2$ siguientes (o el entero inmediatamente superior) para ganar 5 euros. Podemos escribir estos números en una tabla:

TURNOS PERDIDOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TURNOS GANADOS	2	3	3	4	4	5	5	6	6
GANANCIA	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5

Si jugamos un gran número de turnos, ganaremos en la mitad de ellos y perderemos en la otra mitad. Las combinaciones más comunes de turnos ganados y perdidos son entonces las resaltadas en azul en la tabla. Por tanto, lo más probable es que ganemos 5 euros cada 7 turnos. En el caso de 10.000 turnos, la ganancia tiene que ascender a $5 \times 10.000/7 \approx 7143$ euros, de acuerdo con la simulación de la figura 2.



2. Capital (*en azul*) y apuesta realizada (*en rojo*) en 10.000 turnos utilizando el método de Labouchere.

Espero que consideren estos métodos meras curiosidades matemáticas y no los apliquen en el casino. Para olvidar semejante idea, basta echar un vistazo a las dos figuras e imaginarse a uno mismo aumentando más y más la apuesta en una de esas malas rachas. Eso es precisamente lo que me ocurrió hace años, utilizando el método de Labouchere. La apuesta subió tanto, que estuve a punto de perderlo todo al poco tiempo de empezar a jugar.

Mark Fischetti

TELEVISORES DELGADOS

Tubos catódicos más cortos

La estrechez de los televisores de pantalla de plasma o de cristal líquido (LCD) ha conquistado el favor del público, pese a que esos receptores siguen siendo mucho más caros que los clásicos de tubos de rayos catódicos (TRC). Los TRC han perdido atractivo. Los fabricantes están reaccionando diseñando unos tubos de imagen mucho más cortos.

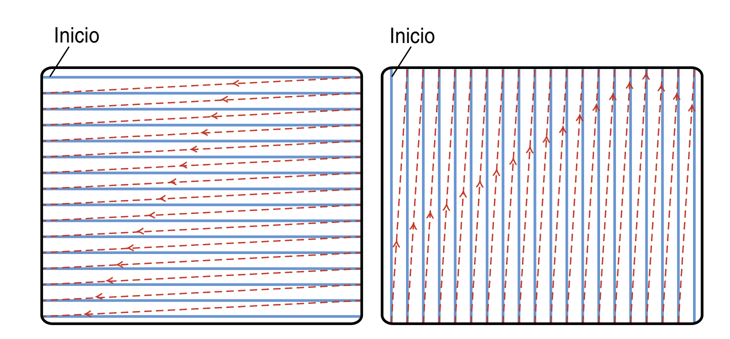
Algunas marcas han dado a conocer sus prototipos de televisores delgados. Un aparato de 30 pulgadas (75 cm) en diagonal tendría un grosor de unas 16 pulgadas (40 cm) en vez de 24 (60 cm) y sería algo más caro. Aunque más voluminosos que las entre 3 y 5 pulgadas (entre 7,5 y 13 cm) de grosor de los receptores de plasma o LCD de la gama de 30 pulgadas, los televisores delgados ahorrarán un espacio considerable y mantendrán su mejor calidad de imagen y su precio más bajo.

Los televisores delgados, que llevan tiempo en los laboratorios, manejarán las habituales señales analógicas radiadas o procedentes de suministradores de TV por cable y podrían ofrecer sintonizadores para las señales de televisión digital portadoras de la televisión de alta definición. Ofrecerán también frontales planos, en vez de los curvos de los actuales TRC.

En un tubo más corto, los tres haces electrónicos que barren horizontalmente la pantalla deben cubrir un ángulo mayor al ir de un costado al otro. Esa abertura deforma la iluminación sobre los píxeles luminiscentes de la pantalla, emisores de la luz que vemos. Para mantener los haces adecuadamente focalizados, el cañón emisor de electrones debe estar continuamente cambiando la forma de la sección transversal de cada haz. A la vez, los imanes deben direccionar cada haz de un modo distinto. La electrónica capaz de controlar todos esos cambios requiere unos algoritmos más refinados y unos procesadores más rápidos.

En general, los fabricantes de televisores convienen en que los TRC clásicos y los cortos resultan demasiado grandes para pantallas de más de 36 pulgadas (90 cm). Pero los TCR podrían seguir dominando por debajo de ese límite, es decir, en el grueso del mercado de televisores. Thomson y Philips están trabajando en TRC digitales de barrido vertical, y no horizontal, que podrían comprimir un aparato de 30 pulgadas hasta las 14 pulgadas (35 cm) e incluso hasta las 12 pulgadas (30 cm).

1. EL TUBO DE RAYOS CATODICOS de un televisor delgado es aproximadamente un 33 por ciento más corto que el de un modelo corriente. En ambos casos, un cañón electrónico acelera y focaliza tres haces electrónicos sobre una máscara metálica. Dos juegos de bobinas desviadoras crean unos campos magnéticos variables que hacen variar los puntos de incidencia de los haces sobre la máscara. En ésta hay ranuras dispuestas convenientemente para que los haces la atraviesen bajo ángulos un poco diferentes, para incidir después en distintas bandas con sustancias fosforescentes, o luminóforos, dispuestas en la cara interna de la pantalla. Cada banda la llenan tres luminóforos, que, al ser activados por los haces, emiten las luces roja, verde y azul que se combinan creando un color cualquiera en un punto, o píxel, de la pantalla. Como en los modelos delgados el cañón está más cerca de la máscara, los haces deben desviarse lateralmente 125 grados en vez de entre 90 y 110 grados.



3. EL BARRIDO DE TRAMA es la técnica que permite crear una imagen línea a línea sobre una pantalla. En los TRC actuales (*izquierda*), el haz electrónico (*azul*) empieza en la esquina superior izquierda, barre una línea horizontal de píxeles (puntos), retrocede entonces de un salto (*rojo*) hasta el extremo izquierdo de la segunda línea, y así sucesivamente. Puede que en los futuros televisores delgados el barrido sea vertical (*derecha*), con lo que disminuiría el ángulo de incidencia del haz respecto a las bandas de luminóforos, permitiendo así unos diseños con un grosor aún menor; este procedimiento requiere una electrónica especial de procesado de señales digitales para reconstruir la información de vídeo.

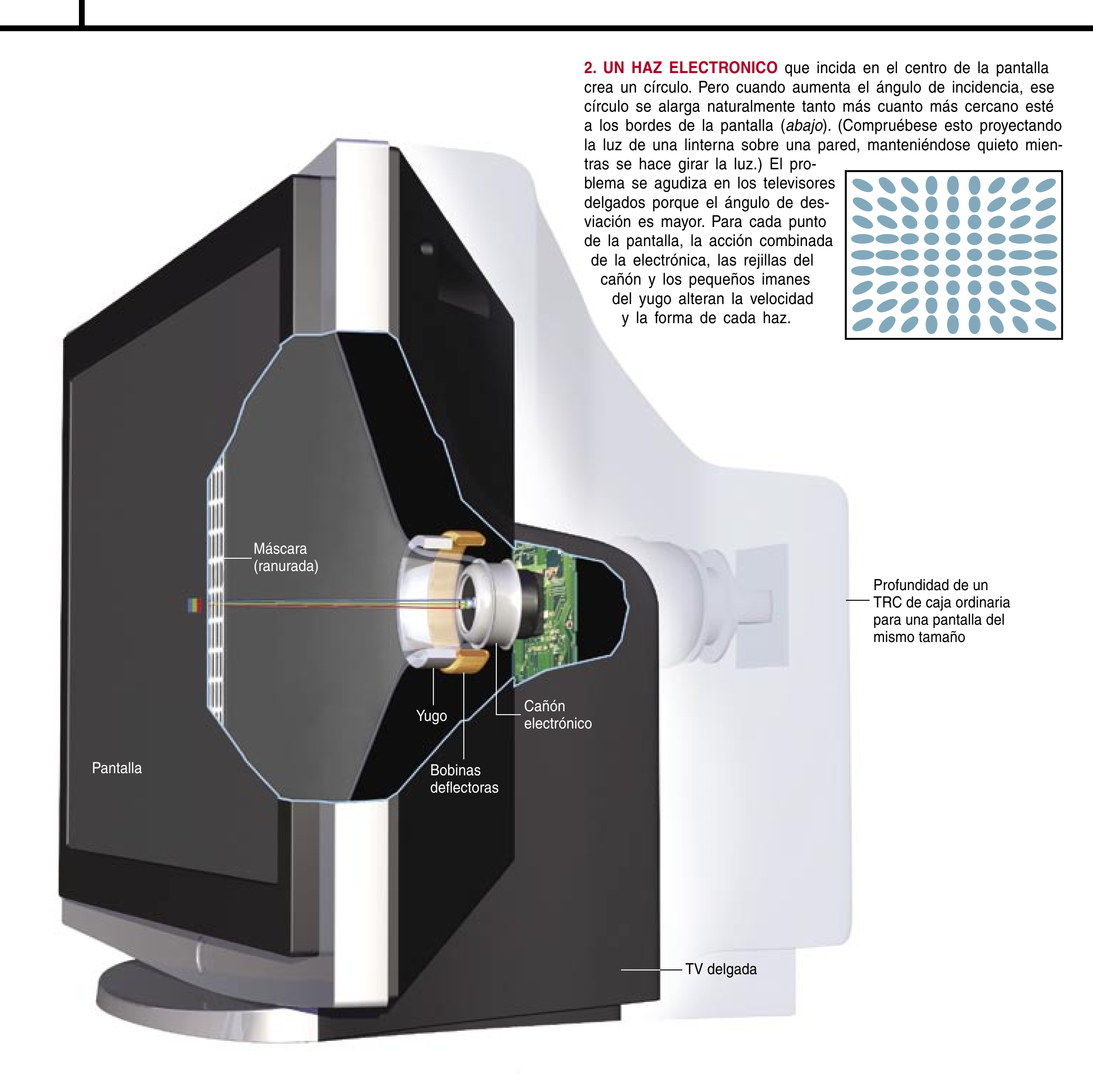
GEORGE RETSECK

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **EL SECRETO DEL ORIFICIO**: Las tres bandas luminiscentes contiguas que, densamente dispuestas, cubren la cara interna de una pantalla de TRC ocupan menos de un milímetro de ancho. La placa perforada, o máscara metálica delgada, está situada unos doce milímetros tras la pantalla y los orificios ranurados que hay en ella tienen un diámetro de un cuarto de píxel aproximadamente. Los tres haces electrónicos, cada uno con más de un milímetro de ancho, llegan a cada orificio con un cierto ángulo entre sí. Como los haces son mayores que cada orificio, sólo pasan algunos electrones.

➤ **CUESTION DE LATITUD**: El campo magnético terrestre puede alterar ligeramente las trayectorias de los haces electrónicos de un TRC. Ese campo tiene su máxima intensidad en los polos, disminuye en el ecuador y su polaridad difiere entre los hemisferios norte y sur. Un receptor construido para Japón dará un color deficiente en Ecuador o Australia. Los fabricantes deben añadir imanes, anillos magnetizables, bobinas o blindajes y ajustarlos para su latitud de destino aproximada. En los aparatos de TV digital, el ajuste de los circuitos electrónicos controladores de los imanes puede incorporarse simplemente mediante un programa.

➤ **PRESION Y VIDRIO**: Al conformarlo, en cada TRC se hace el vacío para que el cátodo —la fuente de electrones— dure mucho tiempo y los electrones de los haces puedan fluir sin perturbaciones. La forma de un televisor delgado es más de cuenco que de cono. En la parte posterior el vidrio debe ser más grueso que en un TRC corriente, para que la presión atmosférica no lo aplaste a causa del vacío interno.



2. UN HAZ ELECTRONICO que incida en el centro de la pantalla crea un círculo. Pero cuando aumenta el ángulo de incidencia, ese círculo se alarga naturalmente tanto más cuanto más cercano esté a los bordes de la pantalla (*abajo*). (Compruébese esto proyectando la luz de una linterna sobre una pared, manteniéndose quieto mientras se hace girar la luz.) El problema se agudiza en los televisores delgados porque el ángulo de desviación es mayor. Para cada punto de la pantalla, la acción combinada de la electrónica, las rejillas del cañón y los pequeños imanes del yugo alteran la velocidad y la forma de cada haz.

Revolución científica

Los jesuitas

CATHOLIC PHYSICS. JESUIT NATURAL PHILOSOPHY IN EARLY MODERN GERMANY, por Marcus Hellyer. University of Notre Dame Press; Notre Dame, 2005.

THE NEW SCIENCE AND JESUIT SCIENCE: SEVENTEENTH CENTURY PERSPECTIVES. Dirigido por Mordechai Feingold. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2003.

"ERGO PERIT COELUM..." DIE SUPERNOVA DES JAHRES 1572 UND DIE ÜBERWINDUNG DER ARISTOTELISCHEN KOSMOLOGIE, por Michael Weichenhan. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2004.

SEARCHING THE HEAVENS AND THE EARTH: THE HISTORY OF JESUIT OBSERVATORIES, por Agustín Udías. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2003.

FERDINAND VERBIEST, S. J. (1623-1688) AND THE CHINESE HEAVEN, por Noël Golvers. Leuven University Press; Lovaina, 2003.

El afianzamiento y extensión de la Revolución Científica resultan ininteligibles si ignoramos la labor determinante de la Compañía de Jesús. El interés de los jesuitas por las ciencias comenzó desde el momento de la fundación de la Orden por el español Ignacio de Loyola (1491-1556), en 1540, escasos años antes de la aparición de la tríada de tratados que marcaron el nuevo rumbo de la *scienza nuova*: el de Leonhardt Fuchs sobre botánica, el de Nicolás Copérnico sobre astronomía y el de Andrés Vesalio sobre anatomía. La aportación jesuítica se sustancia a través de varios factores, unos internos al propio desarrollo de la ciencia (*Catholic Physics. Jesuit Natural Philosophy in Early Modern Germany, The New Science and Jesuit Science: Seventeenth Century Perspectives* y *"Ergo perit coelum..." Die Supernova des Jahres 1572 und die Überwindung der aristotelischen Kosmologie*) y otros relacionados con su institucionalización, es decir, con la enseñanza (*Catholic Physics*) y la creación de observatorios en Occidente y Oriente (*Searching the Heavens and the Earth: The History of Jesuit Observatories* y *Ferdinand Verbiest, S. J. (1623-1688) and the Chinese Heaven*). La investigación actual, al sacar a primer plano la aportación de esa guardia pretoriana de la Iglesia, pone sordina al viejo mito de una ciencia moderna deudora del *ethos* calvinista.

Mérito principalísimo de la Compañía, y exclusivo en su origen, fue el estatuto asignado a la matemática en la nueva filosofía natural. "No podemos hablar de la matemática de los siglos XVI y XVII sin que no aparezca un jesuita en cada rincón", observaba George Sarton en 1940. En sus aulas empezó a oírse que el carácter deductivo de la matemática aplicada a la física ofrecía mayor solidez a la argumentación que las inferencias de la física aristotélica; eran *demonstrationes potissimae*. El aprendizaje de la matemática se impuso obligatorio a los jóvenes formandos jesuitas, con particular profundización por parte de los mejor dotados. De cara al exterior, los dos primeros colegios de la Compañía, el de Messina y el de Roma, instituyeron una cátedra donde no sólo se enseñaban aritmética, geometría y álgebra, sino también "mathesis applicata" (astronomía, mecánica, óptica, acústica, hidráulica, cartografía e ingeniería militar). De ese par de cátedras, la siciliana y la romana, creadas en el ecuador del siglo XVI, se había pasado a 95 a finales del siglo XVIII, cuando Europa estaba sembrada de colegios y universidades de la Compañía: unos 625 antes de la supresión de la Orden en 1773. El caso particular de Alemania resulta paradigmático. Muchas ciudades germanas entregaron a los jesuitas la regencia de sus centros superiores, que se espejaron en el Collegio Romano, transformado en universidad desde 1553. Aquí enseñó quien sería la figura clave del arranque de la matemática, Christopher Clavius (1537-1612).

Conocida es la participación de Clavius en la reforma del calendario promovida por el papa Gregorio XIII en 1582. Sabido es también que Galileo buscó su apoyo. Escribió un manual sobre álgebra y comentó los libros de Euclides y el tratado *Sobre la esfera* de John Sacrobosco, que se convirtieron en textos canónicos de matemática y astronomía. En la última edición, de 1611, de su *In Sphaeram Ioannis de Sacrobosco Commentarius*, indicaba que, tras los nuevos descubrimientos, incluidos los de Galileo, se imponía una reforma del sistema astronómico. Contribuyó a la redacción de la *Ratio studiorum* de la Orden, en particular del relieve concedido a la matemática. En ese código legal, pergeñado en 1586 y elaborado definitivamente en 1599, se formalizaban el método y programas de la enseñanza jesuítica.

Christopher Grienberger (1564-1636) sucedió a Clavius en 1612 al frente de la academia de matemática del Collegio Romano. Entrado en la Orden en 1580, fue llamado en 1591 a Roma para auxiliar a Clavius. De raro talento matemático y habilidad manual, introdujo el montaje ecuatorial del telescopio, observó los satélites de Júpiter y estableció un programa de determinación de las posiciones de las estrellas. Reacio a publicar, omitía siempre su nombre

en los textos que redactaba, así como en los instrumentos ópticos y astronómicos por él diseñados y construidos (entre ellos, un telescopio heliotrópico, que se montaba simultáneamente sobre dos ejes en torno a los cuales podría girar libremente siguiendo la trayectoria del Sol). El discurso sobre la nova de 1604 que la historiografía venía atribuyendo a Odo van Maelcote, salió de su pluma.

Se encargó de la censura técnica de las obras matemáticas escritas por autores jesuitas. Solía remitir cálculos minuciosos y correcciones detalladas al autor, para que los incorporara antes de la publicación. En algún caso, como en el intento de Gregory de St. Vincent de cuadrar el círculo, Grienberger aconsejó al Prepósito general que no lo permitiera, porque sus errores dañarían la reputación de la Compañía.

Resulta interesante por demás su relación con Galileo. Se han trazado incluso paralelismos entre ambas figuras. Más generoso el jesuita, al presentar en 1612 las cartas estelares elogia las observaciones telescópicas del autor de *Sidereus Nuntius*. Dos años más tarde, prestaba su apoyo a los principios hidráulicos de Galileo. Salió en su defensa a propósito de los montes de la Luna y le invitó a frecuentar la sede del Collegio Romano. Con Galileo, en cambio, entró en polémica el jesuita Orazio Grassi (1583-1654) a propósito de la naturaleza de los cometas. Y discutió también con Christopher Scheiner (1573-1650), profesor, primero en la Universidad de Ingolstadt y, más tarde, en Roma. Observó y estudió las manchas solares. En 1630 Scheiner publicó su *Rosa Ursina*, primer estudio completo del Sol. A Scheiner le sucedió en Ingolstadt Johann B. Cysat (1588-1667), quien en 1618 observó el paso de un cometa y determinó su trayectoria y posible composición. Descubrió la Nebulosa de Orión y, en 1631, contempló el tránsito de Mercurio a través del Sol.

La historia de la ciencia suele detenerse en otros maestros del Collegio Romano. Desde 1638 hasta 1680 enseñó allí matemática Athanasius Kircher (1601-1680), famoso también por sus vastos intereses (jeroglíficos egipcios, óptica y magnetismo, entre otros). En 1664 escribió *Mundus subterraneus*, donde especulaba sobre la naturaleza del interior de la Tierra. Abordaba el origen de los terremotos y volcanes; en su opinión, se formaban por la acción de conductos internos que vehiculaban el fuego del centro de la Tierra. Con Giuseppe Asclepi (1707-1775) y Roger Josep Boscovic (1711-1787) podemos cerrar el ciclo de maestros del Collegio Romano. Boscovic adoptó ya la física newtoniana. En su *Philosophiae Naturalis Theoria*, publicado en 1758, presentó una teoría atómica de la materia en la que los átomos constituían puntos centrales de fuerzas sin dimensiones. En la proximidad de los átomos, las fuerzas alternaban entre la atracción y la repulsión; pero, lejos de ellos, sólo operaban las fuerzas de atracción, de acuerdo con la ley newtoniana del inverso del cuadrado de la distancia. Fue elegido miembro de la Regia Sociedad de Londres.



1. Fresco del techo de la Goldener Saal en la antigua universidad jesuita de Dillingen. La filosofía aparece aquí representada por instrumentos matemáticos y experimentales, entre los cuales destaca una bomba de aire.

Nuevo Clavius fue llamado Giovanni Battista Riccioli (1598-1671), profesor en Parma y Bolonia, autor de un monumental *Almagestum Novum*. Más extenso que el *vetus* de Ptolomeo, le supera también en variedad de temas y forma de presentarlos. El jesuita agrega a las cuestiones tratadas por el alejandrino en su *Syntaxis* la instrumentación astronómica, la óptica, la geometría matemática y la cronología. En el prólogo ofrece un resumen somero de la historia de la astronomía, desde sus orígenes bíblicos hasta los griegos, pasando por egipcios, babilonios y caldeos. Pero desde Tales es una historia de la superación de los problemas en un proceso de precisión creciente de los ciclos solares y lunares y movimientos de los planetas. Pasa revista a los calendarios, tablas y efemérides. Y llega al cambio operado en el siglo XVI, si bien limita el alcance del *De revolutionibus* copernicano a la antesala de las Tablas Pruténicas. Aborda la supernova de Tycho (“*Ergo perit coelum...” Die Supernova des Jahres 1572 und die Überwindung der aristotelischen Kosmologie*), así llamada porque el 11 de noviembre de 1572, Tycho Brahe descubrió en la conste-



2. Cuadrante de Tycho construido por Ferdinand Verbiest para el Observatorio de Beijing.



3. Sextante de Tycho construido por Ferdinand Verbiest para el Observatorio de Beijing.

lación de Casiopea una nueva estrella brillante, de luminosidad pareja a la de Júpiter, y a la que consagró el libro *De Nova Stella*. Era una supernova del tipo Ia, que brilló intensamente en el cielo hasta marzo de 1574. En realidad Tycho no vio una estrella nueva, sino una supernova, es decir, la muerte de una estrella. (Sabido es que las supernovas de tipo Ia son explosiones extremadamente luminosas que pueden contemplarse a través de la mayor parte del Universo observable. En nuestro tiempo cobran un interés particular por su determinante papel para las mediciones que revelan la expansión acelerada del universo. Se supone que constituyen los restos de enanas blancas, o restos superdensos de estrellas, que arrastraron material suficiente de una estrella compañera para precipitar una explosión termonuclear.).

La aparición de una nueva estrella visible, *novum et ingens sidus*, en palabras de Riccioli, así como de numerosos tránsitos en los años subsiguientes, contradecía la teoría vigente, que aunaba observación y teoría aristotélica sobre un cosmos que se reputaba inmutable desde el momento de su creación. El mundo habría aparecido de una vez por todas, sin que hubiera una trastienda de donde pudieran ir saliendo nuevos cuerpos celestes. Ahora no sólo se trataba de discutir si su presencia superaba la esfera de los planetas, o superaba sólo la esfera de la Luna, aunque permanecía en la esfera de los planetas, o si se encontraba por debajo de la esfera de la Luna. Había que conocer su composición, su naturaleza y la razón de su aparición. En cualquier caso, no podía negarse ya la mutabilidad del firmamento, contra la cosmología de Aristóteles.

Enciclopédico también era el *Cursus mathematicus* (1661) del jesuita Kaspar Schott. En 23 libros, comienza con un resumen de todas las ramas de la matemática. Tras exponer los principios de aritmética y geometría, derivados de los seis primeros libros de los *Elementos* de Euclides, pasa a la trigonometría, para introducirse luego en la astronomía elemental, astronomía teórica, astronomía práctica, astrología, cronografía (medición del tiempo), geografía, hidrografía, horografía (construcción de relojes), mecánica, estática, hidrostática, hidrotécnica (máquinas hidráulicas), óptica, catóptrica (reflexión y espejos), dióptrica (refracción y lentes), arquitectura militar, armonía o música y sinopsis de disciplinas matemáticas.

Junto a la matemática, la segunda aportación sustancial de los jesuitas a la Revolución Científica fue la absorción y difusión de una filosofía natural auxiliada por la instrumentación. En buena parte de Europa, la historia de la filosofía natural, desde la segunda mitad del siglo XVI hasta la Ilustración, fue *necesariamente* una historia de filosofía natural jesuita. En sus aulas penetró el conocimiento científico emergente a extramuros de la universidad. Y lo hizo al compás del avance de la Revolución. No es lo mismo la filosofía natural de Francisco de Toledo (*Commentaria una cum quaestionibus in octo libros Aristotelis de physica auscultatione*) y Francisco Suárez (*Disputationes metaphysicae*), aristotélica, que la ciencia experimental matematizada que se transmite en vísperas de su extinción canónica. A lo largo de ese período, la noción de filosofía natural no es sinónimo estricto de ciencia, pues abarca muchos capítulos especulativos que hoy consideraríamos a extramuros del concepto de ciencia.

La transición puso a prueba la musculatura de filósofos y teólogos de la Compañía que tenían que habérselas, por un lado, con la asunción y dominio de los métodos empíricos y su instrumental asociado, y, por otro, con la refriega dialéctica contra cartesianos y atomistas, para lo que necesitaban liberarse de una interpretación angosta del aristotelismo. Y empezar por discernir entre lo probable y lo hipotético. Riccioli consideraba el sistema copernicano como el más simple, elegante y mejor construido, pero hipotético. El término hipotético no tenía entonces su significado actual —explicación provisional que no ha alcanzado todavía el estatuto epistemológico de teoría—, sino que se consideraba un constructo matemático al que podía recurrirse para explicar los fenómenos observados, si bien carecía de realidad física. Los jesuitas se mostraron unánimes en establecer que el sistema de Tycho sí constituía una tesis: daba cuenta de los fenómenos observados, era conforme con la físi-

ca y no atentaba contra las Escrituras. Riccioli proponía que sólo Mercurio, Venus y Marte dieran vueltas al Sol. La Tierra permanecería estable en el centro, y en torno a ella girarían la Luna, el Sol y, mucho más alejados, Júpiter y Saturno.

A la noción de cambio natural, quicio de la física aristotélica, se agregó el concepto de cambio artificial, que abría la puerta a la física experimental con la introducción de las máquinas o artefactos. En particular, los relacionados con el vacío, desde la invención del tubo de mercurio de Evangelista Torricelli, si bien centrado en la bomba de aire. Aunque originada en Magdeburgo, la bomba se hizo pública en Wurzburgo con la exposición detallada de la misma por Kaspar Schott, un jesuita que había quedado fascinado ante su funcionamiento, en 1657. El inventor de la bomba había sido Otto von Guericke (1602-86), alcalde de Magdeburgo. En un comienzo era un ingenio muy sencillo, constituido por un receptor de latón redondo de unos treinta centímetros de diámetro, con un pequeña abertura y llave,

Teoría de un Destino Manifiesto

DARK VANISHING. DISCOURSE ON THE EXTINCTION OF PRIMITIVE RACES, por Patrick Brantlinger. Cornell University Press; Ithaca y Londres, 2003.

A este libro podemos acreditarle marca de excelencia. Se ocupa de fenómenos de extinción relacionados con la historia de los pueblos primitivos en conexión con los que identificamos como civilización avanzada, industrial, con los blancos en particular y con los grupos que se mueven ideológicamente dentro del contexto y ámbitos de influencia anglosajones, en una historia del pensamiento que abarca desde 1800 a 1930, y que se interesa, sobre todo, por lo ocurrido en Norteamérica, Australia y Nueva Zelanda. Se reconocen, asimismo, incursiones añadidas en la experiencia imperialista y del capitalismo en Africa.

El tratamiento de la extinción de los pueblos primitivos pertenece al campo de la etnobiología. En este contexto hay dos cuestiones que afectan a la formación de la teoría crítica de las relaciones históricas que se han dado entre sociedades primitivas y sociedades de civilización industrial o urbanas en sus diferentes expansiones geográficas en el tiempo. Así, la reducción de los tamaños demográficos de las primeras ha sido objeto de análisis frecuentes en sus causas e incidencias históricas. En las más reconocidas de éstas, la invasión agresiva por parte de los grupos imperialistas es, en origen, el factor más determinante de su extinción física.

La reducción demográfica por presión ecológica o por presión política se ha manifestado como referente causal de debilidad en las tasas de reproducción y, en consecuencia, como factor de alta susceptibilidad a toda experiencia epidémica. La reducción demográfica tendría su causa dinámica en la reducción de los tamaños ecológicos relacionados con las fuentes de sustentación material de estas poblaciones.

En breve, el discurso de reproducción de los grupos primitivos, en sus contracciones y desarrollos demográficos, viene a ser una función de la forma en que se combinan las variables política, ecológica, económica, e influencia del más fuerte en el control de los recursos que le pueda disputar otra población más débil en dicha capacidad. A este efecto, todo contacto entre individuos culturalmente diferentes en términos de civilización y de subsistencia es causa frecuente de influencia: los individuos jóvenes del segundo grupo son atraídos por las ofertas del primero en forma de emigración. Estas son relaciones de aculturación y en sus efectos producen debilidad demográfica y contracción progresiva de los tamaños de población del grupo llamado primitivo.

Nuestro autor, Brantlinger, se dirige a plantear cuestiones relacionadas con la ansiedad que se produce entre humanistas o gentes éticamente orientadas en el juicio histórico de los encuentros entre civilización y grupo primitivo. En la ansiedad, la repulsa que sigue a la idea de justificar por derecho de civilización la extinción de las poblaciones primitivas es parte de los planteamientos de este libro. En las incidencias intelectuales que han concurrido a entender históricamente el proceso de extinción de dichas poblaciones, la teoría evolucionista ha estado siempre presente en forma de explicación objetiva: en ella la exposición del conocimiento estricto se convierte en pensamiento aparentemente objetivo por neutralismo y ausencia de juicio de valor, por estar sólo en los hechos y en sus resultados.

Así, la explicación evolucionista prevalece sobre cualquier otra. En especial suele imponerse sobre las que tienen origen en la reflexión ética. Desde el humanismo, ésta condena toda extinción de poblaciones cuando sólo tiene por causa la violencia y la guerra como medio de dominación. La explicación evolucionista vendría a establecer que mientras toda especie compite por el control y propiedad de los recursos materiales que le permiten reproducirse, hay también en estos procesos un designio de la propia naturaleza inherente en las formas de manifestarse ésta. Según este principio, la extinción de poblaciones humanas por causa de la intervención violenta de otras de la misma especie formaría parte de dicho designio.

Este principio ha venido contando con el apoyo de filósofos sociales que explican la historia humana en forma de una razón objetiva donde los hechos valen evolutivamente en sus resultados. Así, las sustituciones de unos pueblos por otros resultan ser el efecto de una mayor eficacia competitiva. Por lo mismo, el éxito inglés y angloamericano de 1800 a 1930 asume, en una explicación darwinista, ser la expresión de una superioridad competitiva de los grupos anglosajones. Incluye, asimismo, a la expansión por este medio del capitalismo en sus diferentes formas de eficacia y capacidad de dominación, y supone el reconocimiento de que dicha eficacia es parte del punto en el que se encuentra la evolución humana.

Brantlinger asocia ese pensamiento con ciertas convicciones del protestantismo. Así, se diría, 1) que la esclavitud benefició a los esclavos porque éstos aprendieron e imitaron la cultura que les permitió sobrevivir; 2) que la integración de razas de origen esclavo en la civilización las protegió de su extinción; 3) que tarde o temprano los que son gentes poseedoras de rasgos primitivos serán eliminadas físicamente por selección natural; y 4) que el genocidio es un hecho de naturaleza, consciente en la represión de la resistencia a una dominación.

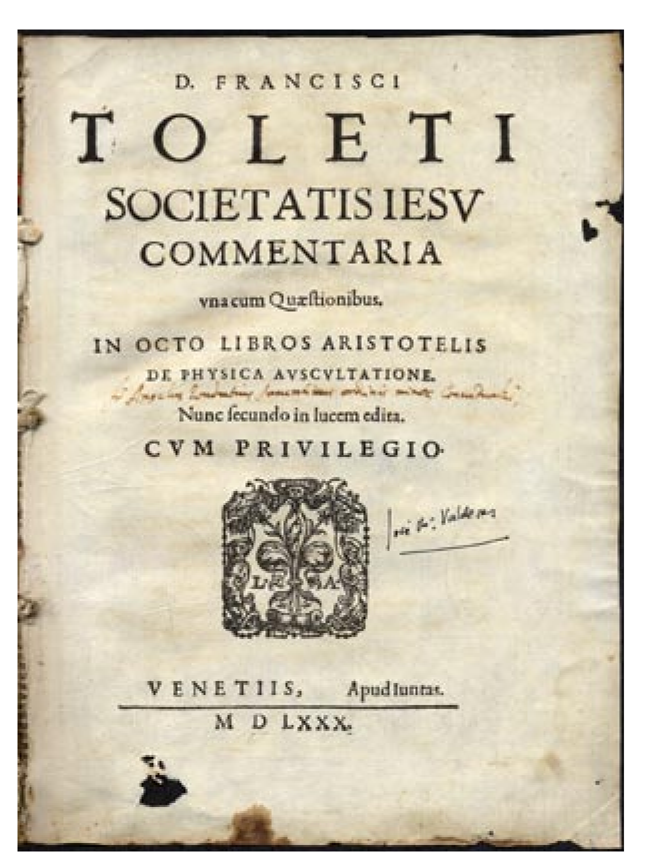
Ese destino manifiesto estaría dado en la supuesta irracionalidad de los pueblos primitivos. El contexto ideológico en que se funda dicha convicción tiene un carácter teleológico, anclado en un darwinismo cuyos principios han estado presentes en las formulaciones de la expansión del protestantismo y del capitalismo. Han sido modos de entender la realidad de la historia de la cultura en el pensamiento de generaciones.

—CLAUDIO ESTEVA FABREGAT

que podía abrirse o cerrarse. La abertura comunicaba con la bomba, básicamente una jeringa gigante de las empleadas para avivar el fuego. El tubo de latón contenía un pistón y dos válvulas. Estas aseguraban que el aire no volviera al receptor, sino que fuera expelido a la atmósfera cuando se empujara el pistón. Schott no admitía que se obtuviera un vacío absoluto y prefería vincular la bomba con otros ingenios pneumáticos ideados para estudiar el aire atmosférico.

Pero donde la ciencia jesuítica iba a destacar por encima de la media, a lo largo de los siglos, sería en la astronomía de observación (*Searching the Heavens and the Earth*: *The History of Jesuit Observatories*). Durante los siglos XVII y XVIII la Compañía levantó observatorios astronómicos, geofísicos y meteorológicos por toda Europa. Antes de la supresión de la Orden, el número de observatorios fundados y dirigidos rondaba la treintena, la cuarta parte de los existentes. En muchos países los primeros observatorios se establecieron en colegios jesuitas. No sólo en Occidente. Jesuitas fueron los primeros científicos europeos en entrar en contacto con la India y China. Introdujeron allí la astronomía occidental. Dirigieron el Observatorio Imperial de Beijing, desde 1644 hasta 1773 (*Ferdinand Verbiest, S. J. (1623-1688) and the Chinese Heaven*). Todos esos observatorios dejaron de funcionar con la supresión de la Compañía en 1773, o antes con su expulsión de Portugal (1759), Francia (1764) y España (1767). En nuestro país, el observatorio del Colegio Imperial precedió en un año al de la Armada, en San Fernando.

Mas, a diferencia de las instituciones públicas, la labor científica de la Compañía tenía un claro fin último misionero. De hecho, encontraron en la astronomía una ayuda valiosa en su tarea evangelizadora en Extremo Oriente. Así lo reconocía Ferdinand Verbiest (1623-1688), director del Observatorio de Beijing, en su *Astronomia Europaea*: "La sagrada religión hace su entrada oficial en China como una reina hermosa, apoyada en los brazos de la astronomía". En 1578 Alessandro Valignano, visitador de las misiones de las Indias Orientales, impulsaba una nueva estrategia de la difusión de la fe, fundada en la adaptación a la cultura local. El cristianismo no podía avanzar por la imposición, sino a través de su inserción en el tejido cultural. Matteo Ricci (1552-1610), formado en el Collegio Romano con Clavius y dotado de una personalidad arrolladora, se presentó, en 1595, vestido con la indumentaria china, como profesor occidental. Tras varios años trabajando en el sur de China, llegó en 1600 a Beijing, procedente de Nanjing, donde había visitado el observatorio astronómico y admirado las esferas armilares, globos celestes, gnomones y otros instrumentos astronómicos, trabajados en bronce. Pero comprobó que los astrónomos chinos no sabían manejarlos. En realidad, se trataba de instrumentos del siglo XIII fabricados por Kuo Shou Ching, quien vivió durante el reinado del emperador mongol Kublai Khan. En 1607, Ricci, que ya dominaba el idioma, con la colaboración de Hsü Kuang Chi, publicó una traducción china del primer libro de Euclides. Tradujo varios libros de Clavius y escribió breves textos sobre geometría. Levantó el primer mapamundi, ofreciendo la ubicación correcta de China en relación a otros países y las nuevas tierras descubiertas de América. A la muerte de Ricci, su obra fue proseguida por sus hermanos de religión. De modo muy particular por Ferdinand Verbiest, quien llegó a Beijing en 1660 y empezó a trabajar en el observatorio bajo la dirección de Johann Adam Schall von Bell (1592-1666).


D. FRANCISCI
TOLETI
SOCIETATIS IESV
COMMENTARIA
vna cum Quæstionibus,
IN OCTO LIBROS ARISTOTELIS
DE PHYSICA AVSCVLTATIONE.
Nunc secundo in lucem edita.
CVM PRIVILEGIO.
VENETIIS, Apud Iuntas.
M D LXXX.

4. Francisco de Toledo fue uno de los autores representativos del aristotelismo abierto de la Compañía.

Verbiest dirigió el observatorio durante 19 años, emprendió una intensa actividad, preparando el calendario anual, enseñando astronomía europea a los astrónomos chinos y construyendo instrumentos astronómicos en sustitución de los viejos. Escribió más de 20 libros sobre astronomía en chino. Dos de los más importantes, conocidos por sus títulos en latín, son *Liber Organicus Astronomiae Europeae* (1668) y *Astronomia Perpetua Imperatoris Kam Hi* (1683). Esta última contenía las efemérides del Sol, la Luna y los planetas, con tablas de los eclipses solares y lunares de 2000 años. Además de sus obras sobre astronomía, escribió también sendos libros sobre el termómetro y el barómetro. Bajo su dirección se construyeron una esfera armilar eclíptica apoyada en cuatro cabezas de dragón, una esfera armilar ecuatorial, un gran globo celeste, un círculo del horizonte para las mediciones del azimut, un cuadrante y un sextante. Todos esos instrumentos se describen en su obra publicada en 1763 en chino, *De Theoria, Usu et Fabrica Instrumentorum Astronomicorum et Mechanicorum*. El propósito de esos instrumentos, amén de su empleo en observaciones astronómicas, era servir de demostración de superioridad de la astronomía occidental.

—LUIS ALONSO

EN EL PROXIMO NUMERO...

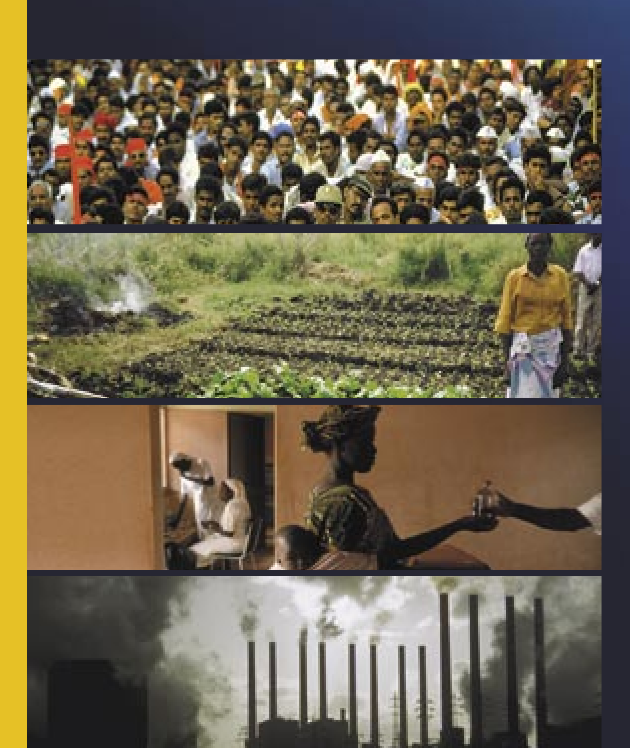
...DE NOVIEMBRE 2005

INVESTIGACION y CIENCIA

¿HACIA DONDE VA LA HUMANIDAD?



ESPECIAL MONOGRAFICO



TRANSICIONES DEMOGRAFICAS

AGRICULTURA DEL TERCER MUNDO

RETOS PARA LA SALUD PUBLICA

ECONOMIA GLOBAL

... Y MAS